

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO EN LOS  
MUNICIPIOS EL ROSAL Y SUBACHOQUE

Andrea Rojas & Diego Garcia.  
Octubre 2016.

Universidad Distrital Francisco José De Caldas.  
Facultad de Ingeniería.  
Ingeniería Catastral Y Geodesia  
Bogotá D.C.

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS EN LOS MUNICIPIOS EL  
ROSAL Y SUBACHOQUE

Andrea Rojas & Diego Garcia.  
20092025075 - 20092025118.

Trabajo de grado mediante la modalidad de monografía

Héctor Javier Fuentes López

Universidad Distrital Francisco José De Caldas.  
Facultad de Ingeniería.  
Ingeniería Catastral Y Geodesia  
Bogotá D.C.  
Octubre 2016

**NOTA DE ACEPTACIÓN Y OBSERVACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

**PRESIDENTE O DIRECTOR**

---

**REVISOR O JURADO**

---

**ESTUDIANTE O AUTOR**

---

Copyright © 2016 por Andrea Rojas & Diego Garcia.  
Todos los derechos reservados.

## **Dedicatoria**

A nuestros padres que han sido un apoyo fundamental en todas las etapas de nuestras vidas, ellos han sido el pilar más importante para llegar hasta esta etapa fundamental de nuestra formación.

Dedico este trabajo a Martha Guerrero y Julián Quinceno, mis padres, por ser un ejemplo durante toda la vida, de ellos aprendí el no rendirme nunca para alcanzar mis metas por difíciles que parezcan.

A Elena Bejarano mi madre quien me guía, apoya y aconseja en las decisiones más importantes tanto personal como académica, de la misma manera a mi hermana Francly que con su experiencia me enseñó las claves del éxito, disciplina y constancia.

## **Agradecimientos**

A Martha, Julián, Elena y Francy nuestros padres y hermanos agradecemos el apoyo incondicional, por acompañarnos en este arduo camino de éxitos y fracasos.

A nuestros amigos que son como hermanos en momentos difíciles, sus valiosos aportes y ayudas hicieron posible este proyecto.

Agradecemos a los profesores Héctor Javier Fuentes y Luis Eduardo Castillo, guía fundamental en la elaboración de este proyecto, y por la colaboración y acompañamiento en la elaboración del mismo.

## Tabla de contenido

Índice de tablas .....	10
Índice de figuras.....	11
Índice de Ecuaciones.....	11
1. Introducción .....	12
2. Formulación de objetivos.....	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Descripción del problema .....	14
4. Justificación .....	16
5. Marco teórico.....	17
5.1 Coberturas del suelo .....	17
5.2 Uso del suelo .....	18
5.3 Clasificación Corine Land Cover .....	19
5.4 Cadenas de Markov.....	19
5.5 Prueba Chi-Cuadrado .....	22
6. Recursos y métodos .....	25
6.1 Descripción de las características de las imágenes originales .....	25
6.1.1 Escena original año 2001.....	25
6.1.2 Escena original año 2015.....	27
7. Zona de estudio y características geográficas principales municipio el Rosal .....	30
7.1 Caracterización área de estudio.....	30
7.1.1 Características Generales.....	30
7.1.2 Ubicación.....	32
7.2 Medio Biológico.....	33
7.2.1 Clima.....	33
7.2.2 Hidrografía.....	34
7.2.3 Vegetación.....	34
7.2.4 Relieve.....	35
7.3 Medio Socioeconómico.....	35
7.3.1 Economía.....	35
7.3.2 Población.....	35

7.3.3	Avalúos Catastrales Integrales .....	37
7.3.4	Actividades económicas .....	38
7.3.5	Ocupación y uso del territorio .....	39
8.	Zona de estudio y características geográficas principales municipio de Subachoque .....	40
8.1	Caracterización del Área de Estudio .....	40
8.1.1	Características Generales .....	40
8.1.2	Ubicación .....	42
8.2	Medio Biológico .....	43
8.2.1	Clima .....	43
8.2.2	Hidrografía .....	43
8.2.3	Vegetación .....	45
8.2.4	Geología .....	46
8.2.5	Relieve .....	46
8.3	Medio Socioeconómico .....	47
8.3.1	Economía .....	47
8.3.2	Población .....	47
8.3.3	Avalúos Catastrales Integrales .....	49
8.3.4	Ocupación y uso del Territorio .....	50
9.	Desarrollo metodológico .....	52
9.1	Fases de levantamiento de uso y cobertura .....	52
9.1.1	Preparación de un plan de trabajo .....	52
9.1.2	Recopilación y análisis de la información preliminar .....	52
9.1.3	Selección de las imágenes a utilizar .....	53
9.1.4	Reconocimiento general de campo .....	53
9.1.5	Elaboración de una leyenda preliminar .....	53
9.1.6	Selección de las áreas de muestreo para definir las claves de Cobertura y Uso de la tierra... 53	53
9.1.7	Interpretación preliminar .....	54
9.1.8	Verificación en campo y ajuste de la leyenda .....	54
9.1.9	Interpretación final .....	55
9.1.10	Transferencia de la información a un formato de salida .....	55
9.2	Proceso con las imágenes Landsat .....	56
9.2.1	Selección Imágenes .....	56
9.2.2	Unión de bandas .....	61



9.2.3 Corrección de Radiancia espectral y Reflectancia.....	62
9.2.4 Elaboración de mosaico .....	62
9.2.5 Recorte de la zona de trabajo .....	63
9.2.6 Sistema de clasificación de cobertura.....	64
9.2.7 Descripción de métodos utilizados .....	66
10. Identificación Pictórico Morfológica y comportamiento espectral de las coberturas del suelo .....	76
10.1 Coberturas.....	76
10.1.1 Bosque Natural Denso.....	76
10.1.2 Pastos Limpios.....	78
10.1.3 Cultivos Confinados.....	80
10.1.4 Tejido Urbano Continúo .....	82
10.1.5 Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales .....	84
10.1.6 Zonas Pantanosas.....	86
10.1.7 Pastos Naturales y Sabanas Herbáceas.....	88
10.1.8 Arbustos y Matorrales.....	90
10.1.9 Mosaico de Cultivos .....	92
10.1.10 Pastos Enmalezados.....	94
11. Modelación del cambio de cobertura del suelo.....	96
11.1 Elaboración matriz de transición con IDIRISI Selva .....	96
11.2 Elaboración matriz de transición según L. Urban y O. Wallin .....	100
12. Resultados y discusión .....	103
12.1 Coberturas año 2001 y 2015 .....	104
12.2 Matriz de transición de IDIRISI .....	106
12.3 Matriz de Transición según L. Urban y O. Wallin .....	107
12.4 Prueba Chi – Cuadrado de Homogeneidad.....	108
12.5 Predicción con la matriz de transición de IDIRISI.....	109
13. Conclusiones .....	118
14. Referencias Bibliográficas .....	120
Anexo A: Cambio usos y coberturas del 2015 al 2015.....	123
Anexo B: Predicción con la matriz de transición según L. Urban y O. Wallin .....	125

## Índice de tablas

TABLA 1. TABLA DE CONTINGENCIA .....	22
TABLA 2. ARCHIVOS DE IMAGEN Y DESCRIPCIÓN DE BANDAS.....	26
TABLA 3. ARCHIVOS DE IMAGEN Y DESCRIPCIÓN DE BANDAS.....	28
TABLA 4. CONVENCIÓN DE NOMENCLATURA DE ARCHIVOS. ....	29
TABLA 5. CENSO GENERAL 2005 PARA EL MUNICIPIO EL ROSAL, CUNDINAMARCA.....	36
TABLA 6. POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD MUNICIPIO EL ROSAL, CUNDINAMARCA.....	36
TABLA 7. HIDROGRAFÍA MUNICIPIO DE SUBACHOQUE .....	44
TABLA 8. CENSO GENERAL 2005 PARA EL MUNICIPIO EL ROSAL, CUNDINAMARCA.....	48
TABLA 9. POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD MUNICIPIO SUBACHOQUE, CUNDINAMARCA.....	48
TABLA 10. RESUMEN NUMÉRICO ECONOMÍA SUBACHOQUE. ....	51
TABLA 11. PROMEDIO PRECIPITACIÓN 30 AÑOS. ....	58
TABLA 12. BANDAS ESCOGIDAS PARA UNIÓN. ....	61
TABLA 13. BANDAS ESCOGIDAS PARA UNIÓN. ....	62
TABLA 14. COMPARACIÓN DE MUESTRAS DE ENTRENAMIENTO. ....	67
TABLA 15. BOSQUE NATURAL DENSO.....	76
TABLA 16. PASTOS LIMPIOS .....	78
TABLA 17. CULTIVOS CONFINADOS .....	80
TABLA 18. TEJIDO URBANO CONTINUO .....	82
TABLA 19. LAGUNAS, LAGOS Y CIÉNAGAS NATURALES .....	84
TABLA 20. ZONAS PANTANOSAS .....	86
TABLA 21. PASTOS NATURALES Y SABANAS HERBÁCEAS .....	88
TABLA 22. ARBUSTOS Y MATORRALES .....	90
TABLA 23. MOSAICO DE CULTIVOS .....	92
TABLA 24. PASTOS ENMALEZADOS .....	94
TABLA 25. ÁREA POR COBERTURAS AÑO 2001.....	104
TABLA 26. ÁREA POR COBERTURAS AÑO 2015.....	104
TABLA 27. MATRIZ DE TRANSICIÓN DE IDIRISI.....	106
TABLA 28. MATRIZ DE TRANSICIÓN SEGÚN L. URBAN Y O. WALLIN.....	107
TABLA 29. TABLA CÁLCULO DE $X^2$ .....	108
TABLA 30. PREDICCIÓN AÑO 2025. ....	109
TABLA 31. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	110
TABLA 32. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE BOSQUES AÑO 2025.....	111
TABLA 33. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	112
TABLA 34. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	112
TABLA 35. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	113
TABLA 36. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	114
TABLA 37. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	115
TABLA 38. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	116
TABLA 39. PROBABILIDAD DE CAMBIOS DE HERBAZALES AÑO 2025.....	117

## Índice de figuras

FIGURA 1. ESCENA COMPLETA IMÁGENES DESCARGADAS LANDSAT 5 .....	25
FIGURA 2. ESCENA COMPLETA IMÁGENES DESCARGADAS LANDSAT 8 .....	27
FIGURA 3. UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO .....	30
FIGURA 4. DIVISIÓN POLÍTICA MUNICIPIO EL ROSAL .....	33
FIGURA 5. AVALÚOS CÁSTRALES MUNICIPIO EL ROSAL AÑO 2014.....	37
FIGURA 6. DIVISIÓN POLÍTICA MUNICIPIO DE SUBACHOQUE .....	42
FIGURA 7. AVALÚOS CÁSTRALES MUNICIPIO DE SUBACHOQUE AÑO 2014 .....	49
FIGURA 8. PROCESO CON LAS IMÁGENES LANDSAT .....	64
FIGURA 9. REGLA DE DECISIÓN DE MÍNIMA DISTANCIA. FUENTE: (ERDAS, 2014).....	69
FIGURA 10. REGLA DE DECISIÓN DEL PARALELEPÍPEDO. FUENTE: (ERDAS, 2014).....	72
FIGURA 11. REGLA DE DECISIÓN DE ESPACIO DE CARACTERÍSTICAS. FUENTE: (ERDAS, 2014) .....	73
FIGURA 12. MÓDULO DE CADENAS DE MARKOV .....	98
FIGURA 13. MÓDULO DE MARKOV CON AUTÓMATAS CELULARES.....	99
FIGURA 14. MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE CAMBIO. ....	101
FIGURA 15. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA MUNICIPIO EL ROSAL Y SUBACHOQUE .....	103
FIGURA 16. COBERTURAS DEL SUELO AÑOS 2001 Y 2015.....	105

## Índice de Ecuaciones

ECUACIÓN 1. PROPIEDAD DE MARKOV .....	20
ECUACIÓN 2. MATRIZ DE TRANSICIÓN .....	21
ECUACIÓN 3. PRUEBA CHI-CUADRADO .....	23
ECUACIÓN 4. FRECUENCIA ESPERADA .....	23
ECUACIÓN 5. PRUEBA DE HIPÓTESIS .....	24
ECUACIÓN 6. PRUEBA DE HIPÓTESIS .....	24
ECUACIÓN 7. DISTANCIA ESPECTRAL DEL PIXEL .....	69
ECUACIÓN 8. DISTANCIA MAHALANOBIS .....	70
ECUACIÓN 9. DISTANCIA MAHALANOBIS .....	71
ECUACIÓN 10. DIVERGENCIA .....	74
ECUACIÓN 11. DIVERGENCIA TRANSFORMADA .....	74
ECUACIÓN 12. JEFFRIES MATUSITA.....	75
ECUACIÓN 13. PROBABILIDAD DE CAMBIO .....	102
ECUACIÓN 14. ACEPTACIÓN HIPÓTESIS NULA.....	108
ECUACIÓN 15. RECHAZO HIPÓTESIS NULA .....	108

## 1. Introducción

El ordenamiento es un concepto que ha acompañado a las civilizaciones o asentamientos humanos a través de la historia. En Colombia este concepto cobro fuerza con la llegada de los españoles y la forma en que dominaban sus colonias, la ordenación se transformó en una política de sumisión de grupos indígenas, en un modelo de ocupación de territorio Europeo. Pero el Significado de ordenamiento del territorio se impuso en la trascendental constitución política de 1991 con la descentralización funcional y administrativa del estado colombiano. Finalmente se consolida el ordenamiento con la expedición de la ley 152 de 1994 “Ley orgánica de ordenamiento territorial”.

El rosal y Subachoque son dos municipios que comparten una singular característica en la transformación de su territorio a través de las últimas décadas, enmarcados por un complejo ordenamiento del territorio, un conflicto armado nacional, crecimiento industrial, poblacional y estructural acelerado. El dinámico cambio sufrido por estos municipios crea la necesidad de establecer mecanismos que ayuden a entender la estructuración del territorio, su comportamiento actual y futuro. Con el análisis de imágenes satelitales de los años 2000 y 2015 y la implementación de modelos estadísticos como las cadenas de Markov, se pretende proyectar los usos y coberturas que estarán presentes en los municipios para el año 2030. Mediante el uso de la estadística, en concreto de la simulación, se desean establecer los escenarios futuros en esta parte del departamento, recae en la innegable posibilidad de conocer de antemano las complicaciones generales en las que recaerían los municipios con un inadecuado uso del territorio, además de determinar posibles problemas ecológicos, funcionales, estructurales, económicos y hasta sociales.

## **2. Formulación de objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

- Hacer un análisis de los cambios de uso del suelo y coberturas de los municipios de Subachoque y El Rosal a través de un análisis multi-temporal y cadenas de Markov.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar un estudio multitemporal del cambio de coberturas de uso del suelo para los municipios de Subachoque y El Rosal.
- Determinar las matrices de transición para las diferentes coberturas presentes en los municipios de Subachoque y El Rosal.
- Establecer mediante Cadenas de Márkov un posible escenario de usos y coberturas de la tierra en los municipios para el año 2025.
- Diagnosticar posibles cambios de uso y coberturas y determinar las probables consecuencias que estos cambios conllevarían a nivel local, departamental, regional y nacional.

### 3. Descripción del problema

Al observar el departamento de Cundinamarca durante las últimas 4 décadas, nos encontramos frente a un fenómeno muy interesante de cambio estructural del territorio, más allá de las interesantes cifras, porcentajes, estadísticas, registros, censos y demás fuentes de información que exponen y argumentan este dramático cambio, existe en el país una serie de eventos políticos, económicos y sociales que son la piedra angular de la transformación que afronta Cundinamarca.

Uno de los factores más relevantes de la transformación surgida en el centro del país, se encuentra en “la estructura urbana y de la función de las ciudades coloniales españolas” (Banco de la República, 1996, p.33), la fundación de Bogotá como un sistema de ciudad colonial interior, desencadenó en el siglo XX una tendencia a la estructuración en torno a esta ciudad principal. Un aspecto básico respecto al cambio estructural transcurrido principalmente en el periodo entre 1973 y 1995, fue la típica trayectoria que relaciona el cambio estructural ciudad región con un desarrollo orientado a lo económico (Mesa de Planificación Regional Bogotá - Cundinamarca; UNDESA; UNCRD, 2005). El crecimiento demográfico exponencial de la ciudad capital impulsó una creciente localización de actividades industriales a sus alrededores, incentivando consigo una transformación del paisaje de Cundinamarca; en unas tres décadas la población de este departamento incrementó su población en aproximadamente un millón de habitantes. En la segunda década del siglo XXI el auge industrial continúa en Cundinamarca, dinamizando la economía, generando empleo e impulsando el crecimiento de las empresas y de los municipios.

Otro aspecto importante es el conflicto armado vivido por generaciones, como si fuera poco el terror causado a la población civil, el secuestro, la extorsión, el narcotráfico, los atentados, el reclutamiento ilícito, la desaparición forzada, la pérdida de bienes civiles y los atentados contra

bienes públicos, surge el fenómeno del desplazamiento forzado y el despojo de tierras (Unidad para la atención y reparación integral a las víctimas, 2013), un fenómeno que de manera obligada y acelerada fomenta la restructuración de ciudades y municipios a lo largo de todo el territorio, Este particular y fundamental escenario del conflicto es una pieza fundamental en la distribución socio espacial en el país durante las últimas décadas.

Las principales ciudades del país se convirtieron en refugio para miles de personas desplazadas, Bogotá es uno de los centros de acogimiento más grandes en cuanto a víctimas de desplazamiento, los municipios aledaños se convirtieron en lugares de paso para llegar a la capital, aunque finalmente muchas de estas familias se quedaron en estos. Según el Comité Municipal para la atención integral a la población desplazada (2009) la población del Rosal y Subachoque declararon haber presenciado grupos de autodefensas y guerrilleros, aunque no se pudo confirmar la presencia o paso de estos, como tampoco se evidencian víctimas de desplazamiento dentro del municipio, pero sí se convirtieron en centro de acogimiento de víctimas de la violencia.

Los factores mencionados anteriormente como principales focos de transformación del territorio en el departamento del centro del país, afectaron en diferente proporción claro está, a cada municipio que este contiene. El Rosal Y Subachoque son dos municipios con alta dinámica de cambio de uso del suelo, pese a no tener un número alto de habitantes, sus ubicaciones y características dieron inicio a un proceso cada vez más acelerado de transformación del medio. Estos dos municipios en el departamento comparten además características similares en su uso del suelo, creando así un interesantísimo foco de investigación, municipios jóvenes con índices altos de transformación son una fuente natural de insumos para toda línea de investigación.

#### 4. Justificación

La transformación del territorio es un fenómeno extenso, en este sentido cada departamento y municipio del territorio colombiano tiene un comportamiento que obedece a sus propias dinámicas. Dentro de este interesante campo de estudio uno de los aspectos más relevantes ha sido el crecimiento demográfico acelerado para el caso particular de estudio de los municipios Subachoque y el Rosal, fenómeno que puede asociarse al éxodo atravesado en el país durante los últimos años: el conflicto armado, la pobreza extrema, el difícil acceso a la educación y la búsqueda de nuevas y mejores oportunidades laborales han hecho que estos municipios alberguen personas de diversas partes del país.

Para entender las dinámicas del cambio del paisaje en los municipios del Rosal y Subachoque, como otra característica importante en los cambios del uso del suelo, debemos introducirnos en un complejo sistema de procesos históricos y sociales, que son la base a partir del cual han forjado su territorio así como las nuevas propensiones económicas, la vecindad con un centro económico poderoso como lo es la capital del país y los nuevos retos regionales, acarrear directamente cambios drásticos en el territorio.

Mediante el análisis de usos del suelo de los municipios del Rosal y Subachoque y su variación a través de los años, se pretende recrear los posibles escenarios para el año 2030; esto es indiscutiblemente una herramienta de gran utilidad pues proporciona una base para una adecuada planificación de estrategias y políticas en el ordenamiento del territorio.

En este estudio se analizaron los dos municipios en conjunto por su indiscutible hermandad, la cual se da por la misma conformación de uno de ellos. El Rosal fue establecido como municipio del país en el año de 1997, el cual se segrega del municipio de Subachoque (Ordenanza N° 25,



1997). La tradición de los Subachoqueños indiscutiblemente prevaleció en las tradiciones de los nuevos Rosalunos, pero no solo comparten historia, características propias del territorio suman a la simetría que los caracteriza, por eso para entender en mayor contexto la dinámica del cambio del territorio se tomaron los dos municipios como base para el análisis.

## **5. Marco teórico**

### **5.1 Coberturas del suelo**

El término cobertura del suelo hace referencia a la descripción de las porciones de tierra que contienen los diferentes tipos de superficies. Expone las características observables y tangibles del suelo y las clasifica según sus propiedades biofísicas. En Colombia no se puede hablar de cobertura del suelo sin mencionar la metodología de origen europeo denominada Corine Land Cover (esta metodología será explicada en detalle más adelante). La clasificación de la cobertura del suelo según la metodología mencionada se realiza en diferentes niveles dependiendo de factores como el objeto del estudio, nivel de detalle, el área a trabajar, insumos disponibles etc. las escalas y niveles de clasificación definidos por la European Environment Agency (1997) son:

Para la escala más pequeña 1:500000 se implementa una clasificación de primer nivel, para lo cual se haría uso de imágenes satelitales con resoluciones espaciales de 150m, acorde para clasificaciones generales a nivel nacional.

Para escalas 1:250000 corresponde una clasificación de segundo nivel, para esta clasificación a nivel departamental son suficiente imágenes satelitales con resoluciones espaciales de 80m.

La escala 1:100000 acorde para una clasificación de tercer nivel, como en nuestro caso, es utilizada para clasificaciones de tipo regional, siendo necesarias imágenes satelitales de media resolución como es el caso de las imágenes proporcionadas por el satélite landsat, con sus sensores ETM+ y TM, con resoluciones espaciales de 30 metros.

Para las escalas más grandes es decir las 1:50000 y las 1:25000, corresponden al cuarto y quinto nivel respectivamente, se hace uso de imágenes Aster, Spot 5, Landsat ETM-, para resoluciones espaciales de 15m a 10m.

El constante monitoreo de las coberturas de la tierra son una cuestión importante para las diferentes autoridades gubernamentales en todo el mundo, su importancia radica en los cambios que atraviesa contantemente el territorio, sus efectos ambientales y económicos y el papel que juega como insumo para la planificación eficiente de la tierra ( Delucchi, y otros, 2015).

## **5.2 Uso del suelo**

Es la caracterización del territorio según su enfoque funcional o su destino económico, haciendo referencia a las funciones que se desarrollan sobre las diferentes cubiertas, el uso del suelo se puede resumir como la clasificación del suelo según las actividades que el hombre realice sobre una cobertura. Aunque los conceptos de uso y cobertura del suelo están muy relacionados, su diferencia radica en que el uso del suelo hace referencia a las actividades que el ser humano tiene destinado para cierta porción del territorio, mientras que la cobertura de la tierra hace referencia a las características propias de una porción el territorio; en pocas palabras el uso del suelo se basa en la cobertura de la tierra.

### **5.3 Clasificación Corine Land Cover**

Corine es un programa propuesto por la comisión de la comunidad Europea, en el año 1985 se desarrolló el proyecto de cobertura de la tierra denominado Corine Land Cover. (European Environment Agency, 1995). Esta metodología describe un procedimiento de clasificación de los usos y coberturas presentes en la tierra para imágenes de satélite de resoluciones medias, como lo son las imágenes del satélite landsat. Colombia por medio del IDEAM y del IGAC adapto esta metodología con el fin de describir, caracterizar, clasificar y finalmente comparar las características del territorio para una escala 1:100.000 (IDEAM, 2005). Los procesos y etapas serán expuestos más adelante junto con la dificultad de trabajar este tipo de metodologías desarrolladas para escalas grandes, esto desencadena complicaciones en áreas pequeñas como lo son El Rosal y Subachoque, que no abarcan ni un 10% de una imagen satelital. Además de la dificultad en la clasificación se le agrega la del análisis multitemporal, siendo necesaria la discriminación puntual de las coberturas para describir los cambios en lapsos del tiempo relativamente cortos.

### **5.4 Cadenas de Markov**

Al hacer referencia a cadenas de Markov directamente se hace alusión a los denominados procesos estocásticos.

“Un proceso estocástico es un modelo matemático que describe el comportamiento de un sistema dinámico, sometido a un fenómeno de naturaleza aleatoria. La presencia de un fenómeno aleatorio hace que el sistema evolucione según un parámetro, que normalmente es el tiempo  $t$  cambiando probabilísticamente de estado” (Rojo & Miranda, 2009, p.3).

Un proceso estocástico representa sucesiones de eventos regidos por leyes de probabilidad, el cambio de uso y cobertura de la tierra es un fenómeno variante en el tiempo, el impacto humano sobre las actividades en la tierra crece con el pasar de los días. La alteración de paisajes enteros como producto del aumento poblacional, las actividades económicas, la demanda de alimentos y vivienda, han generado un cambio en las coberturas de la tierra, dicho fenómeno puede ser descrito por modelos matemáticos (Adebola, Adegboyega, & Olajuyigbe, 2015).

Según Luis Rincón (2012) las cadenas de Markov son:

“modelos en donde, suponiendo conocido el estado presente del sistema, los estados anteriores no tienen influencia en los estados futuros del sistema. Esta condición se llama propiedad de Markov y puede expresarse de la siguiente forma” (p.4):  
 $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$  (*pasado*),  $x_n$  (*presente*),  $x_{n+1}$  (*futuro*), se cumple la igualdad

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_0 = x_0, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n)$$

Ecuación 1. Propiedad de Markov

De esta forma la probabilidad del evento futuro  $X_{n+1} = x_{n+1}$  solo depende el evento  $X_n = x_n$ , mientras que la información correspondiente al evento pasado  $X_0 = x_0, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}$  es irrelevante.

Se requiere para la simulación el uso de una matriz de transición que nos muestra las probabilidades de transición estacionarias para los  $k$  estados posibles, esta matriz debe ser cuadrada con valores siempre positivos, de forma que la suma de cada fila de la matriz siempre sea 1.

$$Si P_{ij} = P(X_{n+1} = x_j | X_n = S_i) \Rightarrow \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ p_{21} & \dots & p_{2k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix}$$

Ecuación 2. Matriz de Transición

El escenario predictivo se da bajo el concepto de  $P^m$ , que es la matriz de probabilidad  $p_{ij}^{(m)}$  de que la cadena pase del estado  $S_i$  al estado  $S_j$  en  $m$  pasos; para cualquier valor de  $m$ . Así pues, dada una cadena de Markov  $P_{ij} = P(X_{n+1} = x_j | X_n = S_i)$  con  $k$  posibles estados  $S_1, \dots, S_k$  y una matriz de transición  $P$  encontramos que:

$P_{ij}$  = Elemento de la  $i$ -ésima fila y  $j$ -ésima columna de la matriz  $P$

$P^m$  = Potencia  $m$ -ésima de  $P$ , con  $(m=2, 3, \dots)$

$P_{ij}^{(m)}$  = Elemento de la fila  $i$  y de la columna  $j$  de la matriz  $P^m$

Según Valera & Castellano (2010) autores como Bell (1974), Lonsdon, et al, (1996) y Briceño (2003) “han comprobado que utilizando datos de sensores remotos y análisis de cadenas de Markov, en los estudios de usos de la tierra, se logra detectar problemas asociados con el impacto espacial generado por los cambios” (p.65).

La intervención de diferentes factores en la cobertura del suelo en el Rosal y Subachoque argumentan los estudios necesarios para tomar medidas con base a los resultados generados, es decir la planeación municipal puede estar orientada por modelos estocásticos.

## 5.5 Prueba Chi-Cuadrado

Se estudió el análisis de variables cualitativas, cuyos datos o valores se han recogido en tablas de frecuencia o tablas de contingencia; esto hace que su tratamiento estadístico sea más organizado y este basado en la misma distribución teórica, la distribución  $\chi^2$  (chi-cuadrado) (Monge Ivars & Pérez, s.f), que en esencia aborda tres tipos de problemas fundamentales: prueba de bondad del ajuste, prueba de independencia y prueba de homogeneidad, esta última es la que compete a nuestro estudio.

*Prueba de Homogeneidad:* En esta podemos analizar si las muestras de carácter cualitativo proceden de una misma población, su principal objetivo es comprobar que las distribuciones de las muestras estudiadas son semejantes, resulta bastante útil este tipo de pruebas ya que esto ayuda al investigador a evaluar la homogeneidad entre dos grupos de datos que se requieren sean de una misma población.

<i>Población</i>	<i>Cobertura 2015</i>	<i>Cobertura 2015</i>
<i>Cobertura 2001</i>	$n_{ij} (e_{ij})$	$n_{ij} (e_{ij})$
<i>Categoría 2001</i>	$n_{ij} (e_{ij})$	$n_{ij} (e_{ij})$

Tabla 1. Tabla de Contingencia

Donde  $e_{ij}$  es la frecuencia esperada bajo el supuesto de homogeneidad.

*Grados de Libertad:* Este dato se refiere al número de datos independientes de un conjunto que se necesitan en su cálculo, menos el número de restricciones que ligan a las observaciones del proceso estadístico. Se calcula, en primer lugar, el número de sumandos, es decir  $m \times n$ , siendo  $n$  y  $m$  el número de filas y número de columnas en la tabla. A esta cantidad se debe restar el número de restricciones impuestas a las frecuencias observadas. Por tanto, si la tabla tiene  $m$  filas y  $n$

columnas, el número de grados de libertad es  $(m - 1)(n - 1)$  (Vicéns Otero & Medina Moral, 2005).

Así, la prueba de homogeneidad estaría dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}}$$

Ecuación 3. Prueba Chi-Cuadrado

Donde  $e_{ij}$  es la frecuencia esperada con el supuesto de homogeneidad que podría representarse así:  $n_i p_j$ , es decir, el número de individuos pertenecientes a la muestra  $i$  por la probabilidad ocurrencia del fenómeno  $j$  en la población. Usaremos:

$$p_i = \frac{n_j}{n} \quad , \text{ es decir, } \quad e_{ij} = \frac{n_i * n_j}{n}$$

Ecuación 4. Frecuencia esperada

Sea  $\pi_{ij}$  la probabilidad de que una observación seleccionada de la población  $i$  sea clasificada en la categoría  $j$ . Entonces las hipótesis son:

$$H_0 = \pi_{1j} = \pi_{2j} = \dots = \pi_{rj} \text{ Para todo } j = 1, 2, \dots, c$$

$$H_1: \text{Al menos una igualdad no se cumple}$$

Las hipótesis pueden expresarse equivalentemente de la siguiente manera:

$H_0$ : *La variable aleatoria tiene la misma distribución de probabilidades en la  $r$  poblaciones.*

$H_1$ : *La variable aleatoria tiene una distribución de probabilidades diferente en al menos una de las poblaciones.*

$$\text{Se acepta } H_0 \text{ si: } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{(n_{ij}-e_{ij})^2}{e_{ij}} < \chi^2_{\alpha,(k-1).(m-1)}$$

Ecuación 5. Prueba de Hipótesis

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si: } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{(n_{ij}-e_{ij})^2}{e_{ij}} \geq \chi^2_{\alpha,(k-1).(m-1)}$$

Ecuación 6. Prueba de hipótesis

Se decidió utilizar una prueba de Homogeneidad, se resolvió así debido a que obtuvimos dos matrices de una misma fuente de datos, sin embargo, una de estas matrices se calculó mediante el apoyo de un software especializado en la obtención de áreas de cambio; por su parte la segunda matriz se obtuvo con un trabajo reflexivo de los investigadores y se realizó año a año hasta completar el número de años establecido en la matriz realizada con el software (14). Así pues, la prueba de homogeneidad nos ayuda a establecer que tan semejantes son en comparación ambas matrices y determinar si ambas pueden poseer información efectiva del área de estudio.



## 6. Recursos y métodos

### 6.1 Descripción de las características de las imágenes originales

#### 6.1.1 Escena original año 2001

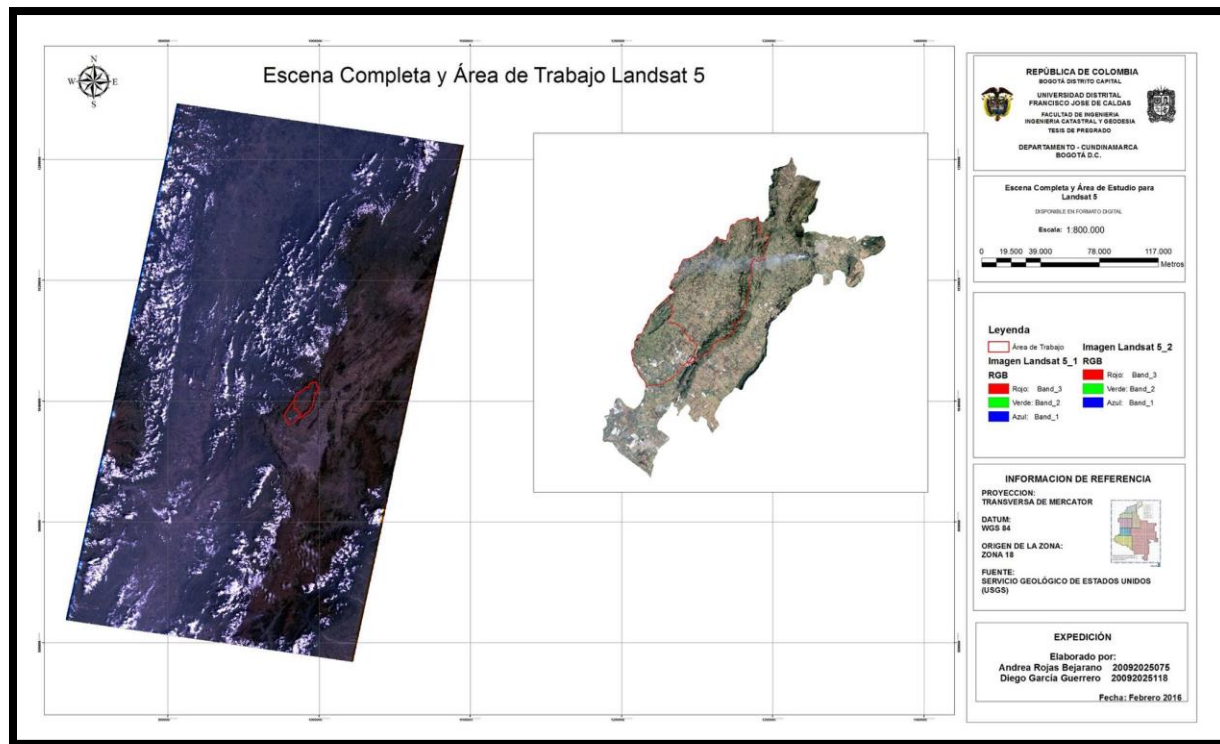


Figura 1. Escena completa Imágenes descargadas Landsat 5

Por la fecha de adquisición necesitada, las imágenes trabajadas fueron capturadas a bordo del satélite Landsat 5 con el sensor TM, fueron tomadas el 29 de enero de 2001 y descargadas del sitio especializado Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>) que es una extensión de la organización americana U.S. Geological Survey y proporciona información imparcial sobre la salud de nuestro ecosistema y el medio ambiente, los peligros naturales que nos amenazan y los impactos del cambio climático (U.S. Geological Survey, 2011). Las imágenes reciben los nombres LT50080562001029XXX01 y LT50080572001029XXX01 y reciben este calificativo debido a la

información mostrada en la tabla N°3, el peso de las imágenes es de 421mg y 423mg respectivamente.

Tabla 2. Archivos de Imagen y Descripción de bandas.

Archivos	Banda	Des. de la Banda	R. Espectral ( $\mu\text{m}$ )	R. Espacial	Sensor	R. Radiom.
LT50080562001029XXX01_B1	1	Azul	0,45-0,52	30m	TM (thematic mapper)	8 Bits
LT50080572001029XXX01_B1						
LT50080562001029XXX01_B2	2	Verde	0,52-0,60			
LT50080572001029XXX01_B2						
LT50080562001029XXX01_B3	3	Rojo	0,63-0,69			
LT50080572001029XXX01_B3						
LT50080562001029XXX01_B4	4	NIR	0,76-0,90			
LT50080572001029XXX01_B4						
LT50080562001029XXX01_B5	5	SWIR 1	1,55-1,75			
LT50080572001029XXX01_B5						
LT50080562001029XXX01_B6	6	TIR	10,4-12,5	120m		
LT50080572001029XXX01_B1						
LT50080562001029XXX01_B7	7	SWIR 2	2,8-2,35	30m		
LT50080572001029XXX01_B7						

Fuente: (IDEAM, 2014)

## 6.1.2 Escena original año 2015

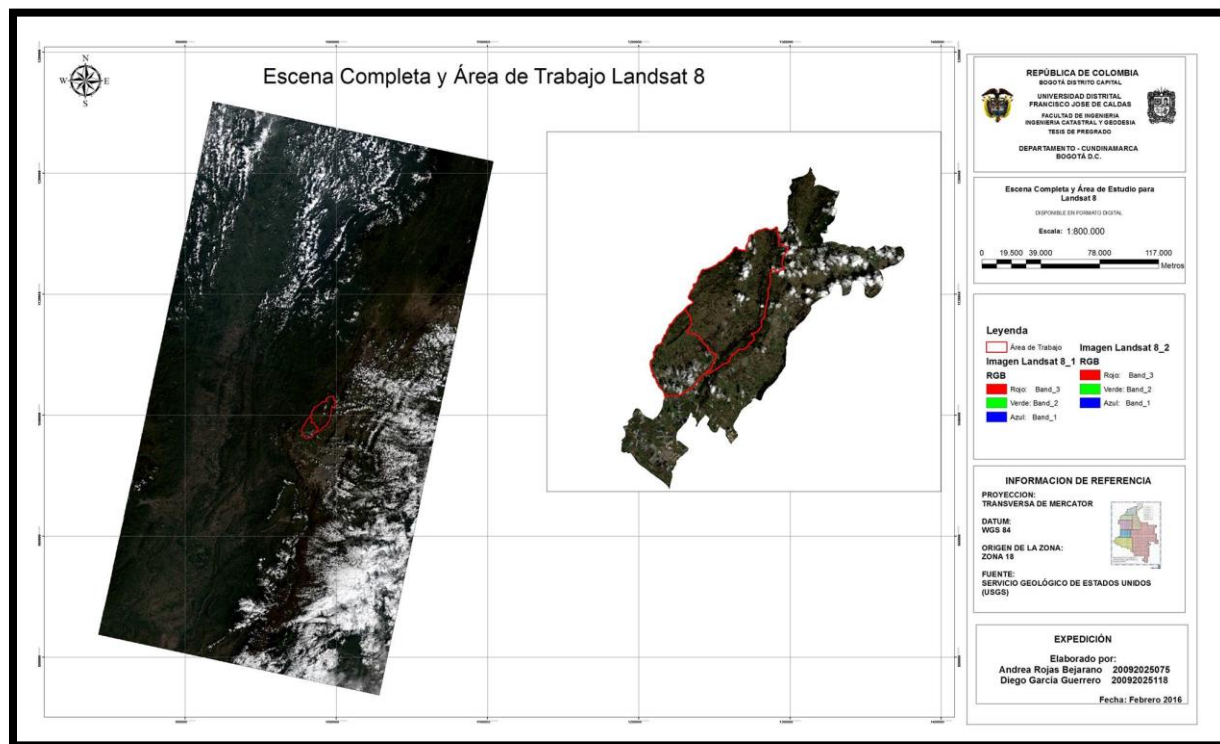


Figura 2. Escena completa imágenes descargadas Landsat 8

Para este año solo fue necesario el uso de una imagen capturada por el satélite OLI (Operational Land Imager) con una proyección UTM Zone 18 con Dátum WGS84, tomada el 21 de febrero de 2015. La imagen recibe el nombre LC80080562015356LGN00 y recibe este calificativo debido a la información mostrada en la tabla N°3, el peso de la imagen es de 1.66GB y comprende los archivos relacionados en la tabla N°2.

Tabla 3. Archivos de Imagen y Descripción de bandas.

Archivos	Banda	Des. de la Banda	R. Espectral (µm)	R. Espacial	Sensor	R. Radiom.
LC80080562015356LGN00_B1	1	Aerosol	0,43-0,45	30m	OLI (Operational Land Imager)	12 Bits
LC80080572015356LGN00_B1		Costero				
LC80080562015356LGN00_B2	2	Azul	0,45-0,51			
LC80080572015356LGN00_B2						
LC80080562015356LGN00_B3	3	Verde	0,53-0,59			
LC80080572015356LGN00_B3						
LC80080562015356LGN00_B4	4	Rojo	0,64-0,67			
LC80080572015356LGN00_B4						
LC80080562015356LGN00_B5	5	Infrarrojo	0,85-0,88			
LC80080572015356LGN00_B5		Cercano				
LC80080562015356LGN00_B6	6	Infrarrojo de Onda Corta	1,57-1,65			
LC80080572015356LGN00_B6						
LC80080562015356LGN00_B7	7	SWIR 2	2,11-2,29			
LC80080572015356LGN00_B7						
LC80080562015356LGN00_B8	8	Pancro,	0,50-0,68	15m		
LC80080572015356LGN00_B8						
LC80080562015356LGN00_B9	9	Cirrus	1,36-1,38	30m		
LC80080572015356LGN00_B9						
LC80080562015356LGN00_B10	10	Sensor	10,60-11,19	100m	TIRS (Thermal Infrared Sensor)	
LC80080572015356LGN00_B10		Infrarrojo Térmico				
LC80080562015356LGN00_B11	11	TIRS 2	11,50-12,51			
LC80080572015356LGN00_B11						

Fuente: IGAC, 2013

Tabla 4. Convención de nomenclatura de archivos.

Identificador				Descripción
2001		2015		
L	L	L	L	Nombre de la misión: Landsat
T	T	C	C	Tipo de sensor (TM) combinado (OLI + TIRS)
5	5	8	8	Número de la misión Landsat
008	008	008	008	Path del producto
056	057	056	057	Row del producto
2001	2001	2015	2015	Año de adquisición de la imagen
029	029	356	356	Día del año de adquisición
XXX	XXX	LGN	LGN	ID de la estación terrena
01	01	00	00	Versión

*Fuente:* (IGAC, 2013)

## 7. Zona de estudio y características geográficas principales municipio el Rosal

### 7.1 Caracterización área de estudio

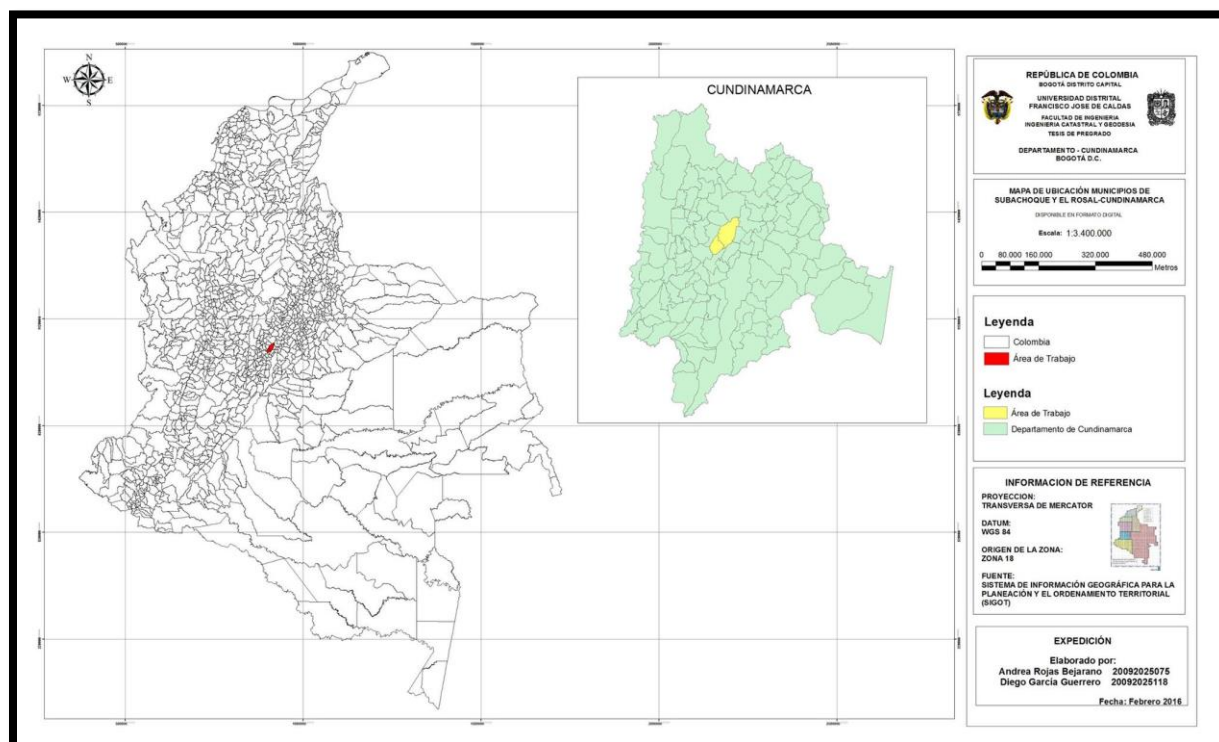


Figura 3. Ubicación zona de estudio

#### 7.1.1 Características Generales

El Rosal es el municipio más joven de Cundinamarca, con carácter rural enmarca su historia dentro del desarrollo social, político y ecológico de la sabana de Bogotá, se encuentra a 21 Km de la capital del país, por la autopista a Medellín (Cl. 80). El Rosal era una inspección de policía adscrita al municipio de Subachoque (Inspección de policía El Rosal), en la década de los 90 los habitantes empezaron a mostrar su inconformidad por la falta de servicios públicos y de infraestructura, aspecto que incentivo a líderes locales a buscar apoyo político del departamento, la organización

territorial y el crecimiento económico impulsaron la propuesta de una autonomía administrativa, en el año 1997 un diputado de la asamblea de Cundinamarca (Néstor Fabio Rico Rey) presentó un proyecto de ordenanza, con el cual exponía la solicitud de la creación del municipio el Rosal; ante esto la asamblea departamental expidió la ordenanza No. 25, el 25 de septiembre de 1997, por medio de la cual constituyó a El Rosal como municipio del país, en segregación del municipio de Subachoque.

El presupuesto del municipio supera los 18 mil millones de pesos, de los cuales casi una tercera parte proviene de los ingresos tributarios, del impuesto predial, de la industria, del comercio y otros impuestos recaudados (Alcaldía El Rosal, 2012). Actualmente el municipio cuenta con servicio de agua las 24 horas del día en cerca del 90% de la zona rural y un 100% de la zona urbana, la zona urbana tiene total cobertura en alcantarillado y aseo, mientras que en la parte veredal la cobertura es de 12% y 75% respectivamente (Alcaldía El Rosal, 2011). Veredas como la Hondura Chingafrio y Hondura Tibagota se abastecen de este líquido de nacederos o quebradas, lo que expone una problemática importante a ser tomada en cuenta en los esquemas de ordenamiento territorial. Respecto al servicio de energía y alumbrado público se abastece de la línea de la hidroeléctrica el Guavio, conformada por una red de postes de concreto, aisladores, transformadores, luminarias etc. que se encuentran en general en buen estado, sin dejar de lado las quejas sobre la ampliación de cobertura en el municipio. La zona urbana también goza de total cobertura en los servicios públicos de gas y telecomunicaciones, aunque con el reiterado problema de escasa cobertura en las zonas rurales.

### 7.1.2 Ubicación

El Rosal es uno de los 116 municipios que hacen parte del departamento de Cundinamarca, localizado al Noroccidente de la sabana de Bogotá, su cabecera municipal se encuentra ubicado en las coordenadas 4°51'08" de latitud Norte y 74°15'33" de longitud oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 2685 (Alcaldía Rosal , 2004). Los límites establecidos según ordenanza 25 de 1997 de la asamblea de Cundinamarca son al nororiente con el municipio de Subachoque, al noroccidente con el municipio de San Francisco, al sur oriente con el municipio de Madrid y al sur occidente con el municipio de Facatativá.

El territorio municipal cuenta con un área aproximada de 8.942 Hectáreas. El suelo denominado como urbano es de aproximadamente 82.67 Hectáreas, se entiende como perímetro urbano:

*“áreas del territorio municipal destinadas a usos urbanos por el Esquema de Ordenamiento, que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, posibilitándose su urbanización y edificación, según sea el caso. El perímetro urbano fue delimitado según el perímetro sanitario y de servicios, con el fin de determinar la extensión del sector urbano, la determinación de los usos del suelo y la prestación de servicios.”* (Municipio de El Rosal, 2011).

Según lo determinado en el esquema de ordenamiento territorial aprobado mediante el acuerdo No. 013 de 2001 y acuerdo No. 005 de 2005, adopta la división territorial del municipio en: **área urbana** es una extensión atípica, ya que se encuentra distribuida en tres perímetros separados entre sí, el principal la cabecera municipal (el Rosal), que corresponde al casco urbano tradicional, es donde se encuentran las oficinas institucionales, la iglesia y el comando de policía, cuenta con un área aproximada de 71.30 hectáreas, y dos núcleos o áreas urbanas aisladas conocidos como San



José y Campo Alegre con 5.01 y 6.36 hectáreas respectivamente; las *áreas de expansión urbana* 1, 2<sup>a</sup>, 3, 4 y sector Campo alegre y finalmente el *sector rural* comprendido por 13 veredas (Puerta de Cuero, San Antonio, El Rosal, Santa Bárbara, Cruz Verde, Buenavista, El Caucho, El Rodeo, La Piñuela, La porquera, Tibagota, Hondura Chingafrio, Hondura Tibagota).

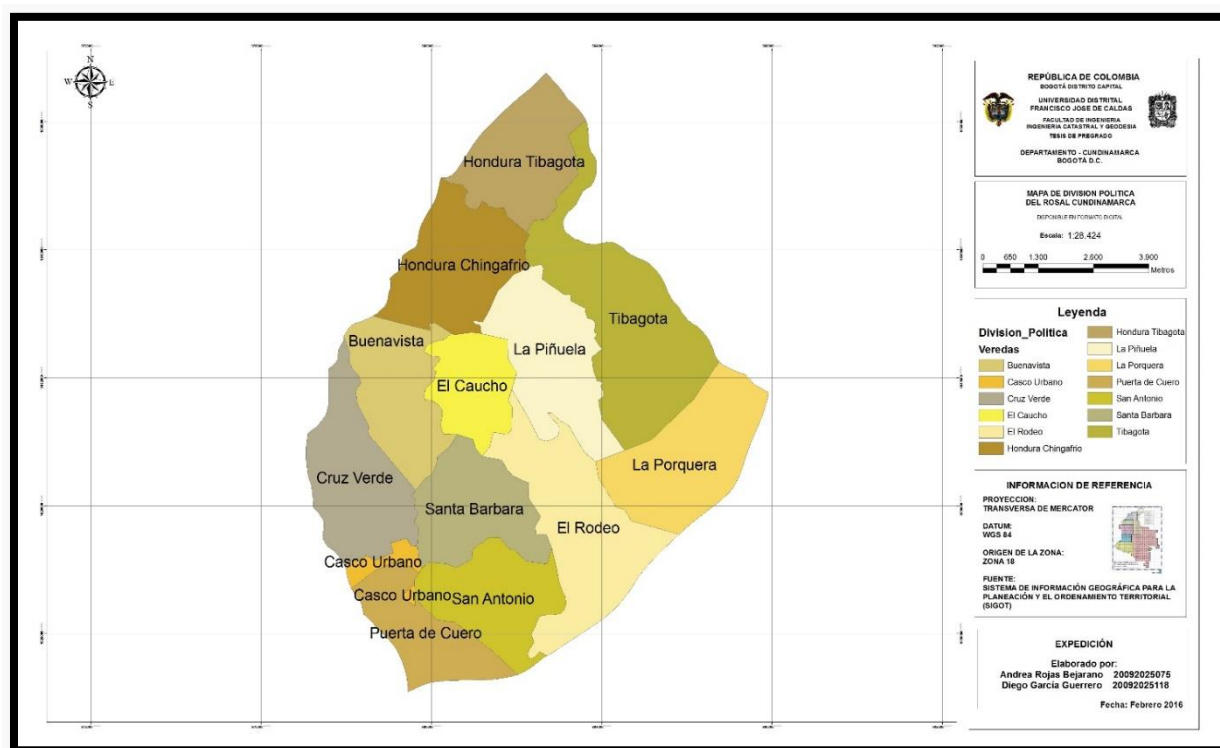


Figura 4. División política municipio el Rosal

## 7.2 Medio Biológico

### 7.2.1 Clima

Por su localización geográfica y condiciones ambientales, como vientos y régimen de lluvias, El Rosal pertenece al amplio grupo de municipios sabaneros, de clima frío, con temperatura promedio ambiente de 13° y con una altitud que oscila entre los 2650 y los 3350 m.s.n.m. Por su altitud comprende tierras de clima frío y zonas de paramo en las partes más altas. La temperatura puede

oscilar hasta alcanzar temperaturas de hasta 0°, los inviernos al igual que los veranos son muy prolongados, aspectos no muy favorables para la agricultura, afectando directamente el desarrollo económico de sus habitantes. Tiene una precipitación variable entre 650 – 1000 mm año, donde los meses secos van desde Diciembre a Enero, estos dan origen a heladas que impactan cultivos y pastos.

### **7.2.2 Hidrografía**

La estructura hidrológica del municipio está conformada por la cuenca del río Bogotá, aunque la principal cuenca hidrográfica del municipio es la del río Subachoque al oriente, es la más importante vertiente de la región y recibe las aguas de las cordilleras que circundan el valle; las quebradas de Cruz verde, Buenavista, Curubitos 1 y 2, pasó Amarillo, Chorro del Hato, Puerta de Cuero, la Matua, el Caucho, Piñuela y Hierbabuena hacen parte las microcuencas del municipio. Se encuentra también otras cuencas importantes como la del río Negro, río San Francisco y Quebrada el Mapuro. Además se encuentran un buen número de pozos profundos de aguas subterráneas.

La expansión agrícola, la actividad minera y el crecimiento urbano del municipio son una fuerte amenaza para los nacimientos de agua, la devastación de vegetación nativa como derivación de la quema y tala para estas actividades han derivado en un eminente peligro para la posible desaparición de importantes recursos hídricos.

### **7.2.3 Vegetación**

En gran parte del territorio se encuentra vegetación natural como relictos de bosque en asociaciones de Roble Chusque, Aliso, Tunos Chucaros, Gaques, Uva Camora y otros con menos cobertura e importancia. Cerca de las quebradas y en las partes altas se encuentra el Aliso, los

árboles de Cordia (salvio), Cedrela Montaña (cedro), Nogal Negro, Encenillo, Olivo de Cera, principalmente en las veredas cruz verde y Buenavista.

#### **7.2.4 Relieve**

El municipio es un valle caracterizado por su relieve plano, de sus características de suelos y su relieve se establece su potencial en la agricultura y ganadería. Se caracteriza por dos grandes componentes topográficos: la parte plana hacia el oriente cubriendo un 32% del territorio municipal y una parte montañosa hacia el occidente con el 68% del territorio restante.

### **7.3 Medio Socioeconómico**

#### **7.3.1 Economía**

Los suelos del municipio son la base económica con una disposición agroindustrial, en algunos sectores como la Vereda del Rodeo, se encuentran ubicados territorios para la explotación de gravas y similares para la construcción (Alcaldía El Rosal, 2011). En el Rosal la mayor parte del territorio está destinada a la agricultura, productos como la papa, la arveja, zanahoria y maíz son muy comunes en las fincas, otras actividades en constante crecimiento son la floricultura y la ganadería.

#### **7.3.2 Población**

Según la Alcaldía de El Rosal (2011), la población se estima en 15.731 habitantes, la mayor parte concentrada en la parte urbana. Según la tabla N° 4 la población en el 2005 era de 13.502 habitantes aproximadamente, es decir que este pequeño municipio alberga alrededor de 400 nuevas personas anualmente.

Tabla 5. Censo General 2005 para el municipio El Rosal, Cundinamarca.

<b>COLOMBIA. Censo General 2005</b>									
<b>Resultados Ajuste Censal (a Junio 30 de 2005) - MUNICIPIOS</b>									
Cód. Dep.	Nombre Dep.	Cód. Mun	Nombre Mun.	Población conciliada			Omisión Censal		
				Total 2005	Cabecera 2005	Resto 2005	% O. total	% O. cabecera	% O. resto
25	Cundi.	25260	13.502	13.502	9.201	4.301	2.30	2.29	2.30

Fuente. (DANE, 2016)

Según la tabla N°5 la mayoría de habitantes son hombres y se concentran en edades menores a los 20 años, es decir se tiene una población joven en el municipio. Conforme aumenta la edad la cantidad de habitantes es menor, afianzando lo expuesto de la tendencia del aumento de la población joven del municipio, esto traducido a aspectos económicos, se estima un aumento de la población considerada productiva dentro de un territorio.

Tabla 6. Población por grupos de edad municipio El Rosal, Cundinamarca.

<b>POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD</b>			
<b>ÁREA # 25260</b>	<b>CUNDINAMARCA, EL ROSAL</b>		
<b>Edad en grupos quinquenales</b>	<b>Sexo</b>		<b>Total</b>
	<b>Hombre</b>	<b>Mujer</b>	
0 a 4 años	770	775	1545
5 a 9 años	814	840	1654
10 a 14 años	766	712	1478
15 a 19 años	625	591	1216
20 a 24 años	661	683	1344
25 a 29 años	672	612	1284
30 a 34 años	577	551	1128
35 a 39 años	494	492	986
40 a 44 años	394	405	799
45 a 49 años	284	276	560
50 a 54 años	246	230	476
55 a 59 años	175	134	309
60 a 64 años	97	114	211
65 a 69 años	76	80	156
70 a 74 años	59	73	132
75 a 79 años	39	47	86

80 años o más	31	37	68
<b>Total</b>	<b>6780</b>	<b>6652</b>	<b>13432</b>

Fuente. (DANE, 2016)

### 7.3.3 Avalúos Catastrales Integrales

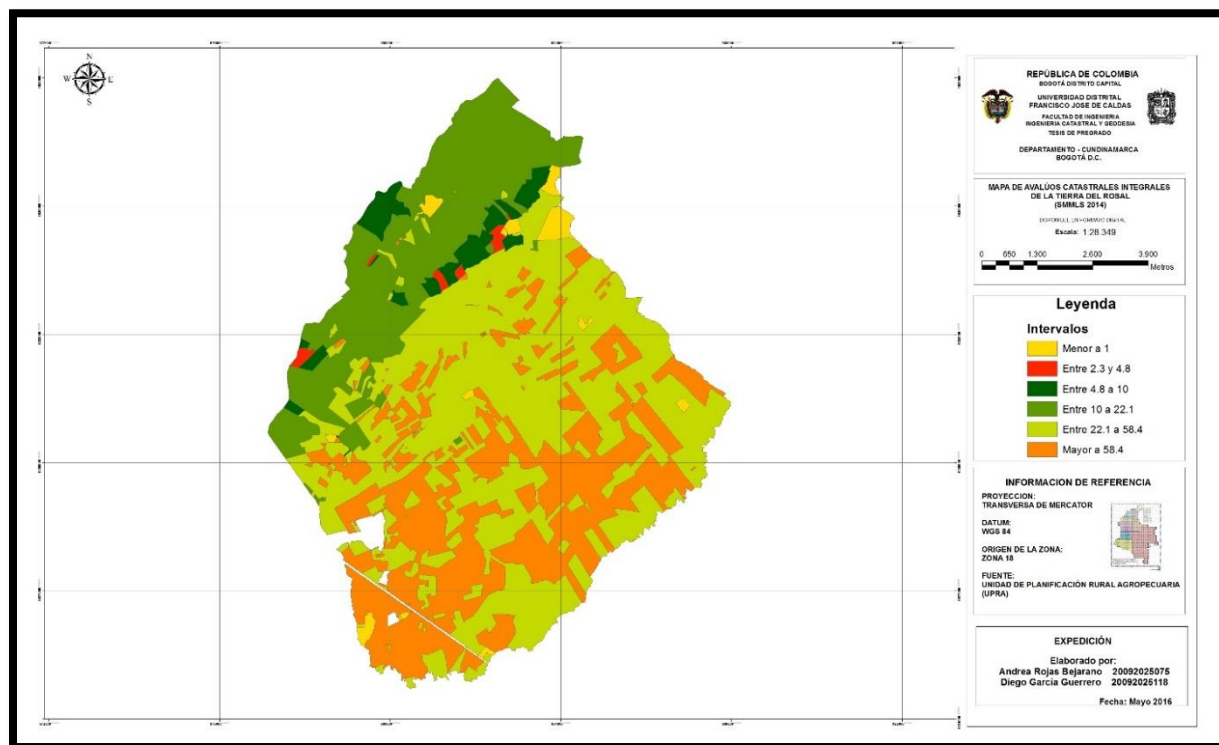


Figura 5. Avalúos Cástrales municipio el Rosal año 2014

El mapa de avalúos catastrales fue hecho con información de la unidad de planificación rural agropecuaria (UPRA), la información fue descargada del catálogo de datos abierto del IDEAM.

*“El mapa de avalúos catastrales permite identificar la tendencia de precios de la tierra en el territorio (municipio, departamento, región, etc). De esta manera, se pueden identificar las áreas cuyos precios de la tierra tienden a ser altos, medios y bajos: con rangos de valores en SMMLV, menor a 1, entre 1 y 2,3, entre 2,3 y 4,8, 4,8 a 10, 10 a 22,1, 22,1 a 58,4 y mayor a 58.4”.* (UPRA, 2015).

La parte Noroccidental del municipio concentra principalmente precios de la tierra medios y bajos, con intervalos menores a 22.1 SMMLV, en esta parte del municipio se encuentran extensas zonas de pastos enmalezados, pastos limpios, arbustos y matorrales junto con áreas de bosque en menor proporción. La concentración de los precios más elevados del suelo se centra en el resto del municipio, los precios que van desde 22.1 SMMLV en adelante corresponden a predios con algún tipo de actividad económica, predios destinados a algún tipo de cultivo, o invernaderos que son característicos de toda zona. La zona urbana se encuentra en blanco, es decir solo se estimaron los avalúos catastrales de la zona rural.

#### **7.3.4 Actividades económicas**

Según el esquema de ordenamiento territorial del municipio, este se establece con una vocación agropecuaria, forestal, agroindustrial, ecoturística y de servicios corredores viales. Siendo un municipio de carácter rural, con un alto porcentaje de cultivos mixtos, zonas de pastos e invernaderos, las principales actividades económicas del municipio son la Floricultura, la ganadería y agricultura, este último con menor importancia, los principales cultivos son los de papa criolla, arveja, zanahoria, cebada, maíz y fresa; los cuales en los últimos años no presentan rendimientos importantes en su producción. La producción pecuaria se centra principalmente en ganado bovino con producción de carne y leche. Otras producciones en menor escala son las de porcinos, aves, conejos, caprinos y colmenas que se encuentran principalmente en la zona rural y son la producción y sustento de pequeñas familias. El cultivo de flores es sin duda uno de los más fuertes de este municipio, destacándose no solo a nivel nacional sino internacional, entre las variedades producidas se encuentran: rosa, clavel, astromelia y pompones. También se destaca la actividad minera, en veredas como el Rodeo donde se presenta explotación de gravas y agregados para la construcción.

Por su especial ubicación respecto a un centro urbano con alta densidad poblacional como lo es Bogotá, el eco turismo del municipio se ha incrementado; las antiguas y las nuevas familias vieron en este una nueva oportunidad de hacer nuevos y mejores ingresos.

### **7.3.5 Ocupación y uso del territorio**

Según el esquema de ordenamiento territorial adoptado mediante acuerdo municipal N° 013 de 2001 la ocupación del suelo del municipio se clasifica en suelo urbano, suelo de expansión urbana, suelo rural, suelo suburbano y suelos de protección.

El suelo urbano del municipio está conformado por un área aproximada de 82.67 hectáreas, que se distribuyen en tres sectores separados entre sí; el primero es el núcleo urbano central, el más antiguo del municipio con un área aproximada de 71.30 hectáreas, y dos núcleos urbanos llamados San José con 5.01 Hectáreas y Campo Alegre con 6.36 Hectáreas aproximadamente (Alcaldía El Rosal, 2011).

El suelo de expansión urbana establecido según el acuerdo 388 de 1997, se entiende como la porción del suelo que se habilitara para el uso urbano dentro de la vigencia del esquema de ordenamiento territorial. Esta zona se ajustara a las previsiones de crecimiento del municipio, teniendo en cuenta la posibilidad de dotarla con infraestructura vial, de servicios, áreas libres y equipamientos.

El Suelo rural es aquel no apto para la urbanización por su destinación de usos agroindustriales o de explotación de recursos naturales. El área aproximada de suelo rural en el municipio es de 6105,22 hectáreas.

El suelo suburbano se localiza dentro del área rural del municipio, en este convergen usos del suelo y formas de vida tanto del campo como de la ciudad, garantizando el autoabastecimiento en

servicios públicos. Se encuentran 31,71 hectáreas en el municipio, conformada por: Área suburbana I y II y el área suburbana con fines industriales cerca al límite Madrid, Facatativá, localizados a los lados del corredor vial de la Autopista Medellín.

Según el esquema de ordenamiento territorial se estableció como suelo de protección 2655,37 hectáreas, estas áreas que por sus características geográficas, paisajísticas, ambientales, o por ser consideradas de utilidad pública, tienen restricción a toda posibilidad de urbanización.

## **8. Zona de estudio y características geográficas principales municipio de Subachoque**

### **8.1 Caracterización del Área de Estudio**

#### **8.1.1 Características Generales**

Subachoque según el diccionario chibcha significa “trabajo de frente”, frente que en técnica militar moderna equivale a línea de fuego o simplemente frente. En otras palabras, labranza de un frente. Suba significa frente y choque trabajo. En este municipio habitaron dos pueblos aborígenes los Subachoque y chingas los cuales hacen parte de los muiscas. En los primeros años de la colonia la Real Audiencia adjudicó tierras en el Valle de Subachoque a algunos colonos españoles; años más tarde se ordenó trasladar los Subachoque a Tabio y los Chingas a Tenjo; con el traslado el Valle de Subachoque quedó sin aborígenes; después de algunos años, los antiguos habitantes de Subachoque escaparon de la encomienda de Tabio y regresaron al territorio de Subachoque a trabajar como sirvientes.



En abril de 1861 se dio la batalla más sangrienta de la revolución de 1860-1861, episodio de trascendente significación en la vida política del país por cuanto allí se preconizó la caída de Confederación Granadina cuyo representante era el presidente Mariano Ospina Rodríguez. En el sitio de Cruz Verde jurisdicción del Rosal cayó muerto el General José María Obando el 29 de abril, fue provisionalmente enterrado allí y luego inhumado en el cementerio de Funza el 2 de mayo.

Por contrato de 25 de febrero de 1853 Don Carlos Martín tomó en arrendamiento por nueve años la fuente salina de Subachoque y minas adyacentes. A mediados del siglo se estableció la ferrería de la Pradera. La familia alemana estableció el primer Chircal a comienzos de siglo para hacer ladrillo y teja barro.

El arquitecto Luis Felipe Alemán fue el constructor del edificio de hotel del Salto de Tequendama en 1924. En 1927 llegó a Subachoque el primer carro, un camión marca “Fowlers” de siete toneladas, movido a vapor, que desarrollaba una velocidad de 20 Kms. por hora, de propiedad de Jorge Escandón, manejado por Juan Evangelista Gómez. Se utilizaba para llevar madera aserrada y carbón mineral de la Finca “La Laja” a Madrid. En 1928 llegó el primer bus de pasajeros, un Chevrolet de cuatro cilindros de propiedad de Marcos Latorre, que también manejó el Señor Gómez.

## 8.1.2 Ubicación

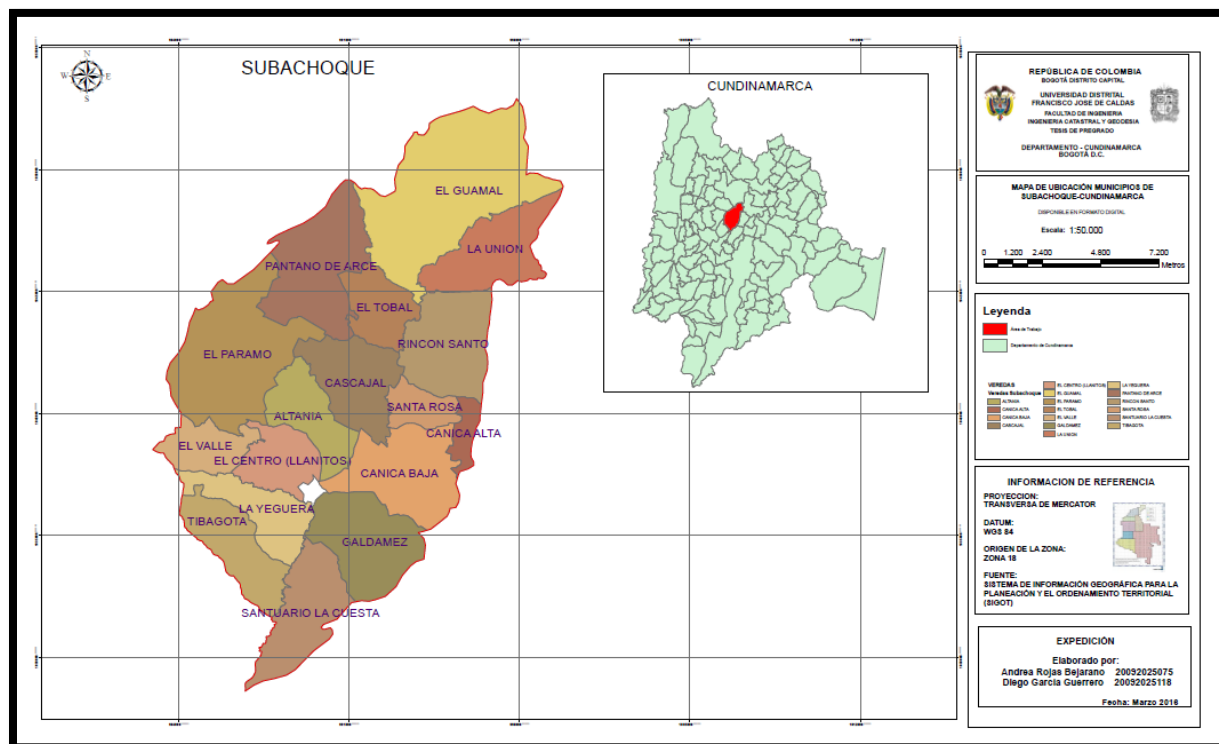


Figura 6. División política municipio de Subachoque

Subachoque se sitúa a  $4^{\circ}56'$  de latitud Norte y  $74^{\circ}11'$  de longitud oeste, con una extensión de  $21.153\text{Km}^2$  y una altitud entre 2.663 y 3.650 m.s.n.m. Limita por el Oriente con los municipios de Tenjo y Tabio; por el Occidente con los municipios de San Francisco, Pacho y Supata; al Sur se encuentran los municipios de Madrid y El Rosal y por el Norte con Zipaquirá. El municipio está localizado a 45 Km del noroccidente de la ciudad de Bogotá.

El territorio municipal está dividido político-administrativamente por la cabecera municipal, el centro poblado urbano de La Pradera, el centro poblado rural de Galdámez y 17 veredas.

## **8.2 Medio Biológico**

### **8.2.1 Clima**

Según la clasificación climática Caldas, el municipio de Subachoque se caracteriza por un tipo de clima frío semihumedo, con una temperatura que oscila entre los 6.6 y 19.5°C siendo enero el mes más frío con una temperatura media de 13°C y marzo el mes más caluroso con 13.8°C de temperatura media; La precipitación promedio anual es de 865 mms, en el mes más seco se presentan precipitaciones de 30mm mientras que Octubre es el de mayor precipitación alcanzando 127 mm (Climate-Data, 2016).

### **8.2.2 Hidrografía**

El municipio de Subachoque hace parte de la cuenca media del río Bogotá y es tributaria, cuenta además con las Cascadas del Guamal, ubicadas en la parte media de la inspección del Guamal; laguna del Verjón o del Salitre ubicada en la vereda el Guamal; la laguna negra, la Laguna Tibagotá ubicada en la vereda del mismo nombre en límites con el municipio El Rosal, el embalse Pantano de Arce que sirve de almacenamiento de agua del acueducto municipal y las quebradas que se registran en la tabla N°4.

Las aguas superficiales del municipio se pueden clasificar en dos grupos:

- Sistema Natural: conformado por las quebradas, ríos y lagunas.

Tabla 7. Hidrografía municipio de Subachoque

Cuenca Mayor	Subcuenca	Área (Ha)	Quebradas
Río Bogotá	Río Subachoque	40.86	La Mina
			Abra
			Negra
			El Higuieron
			La Piñula
			El Aliso
			Cañizal
			La Angostura
			El Alivo
			El Aliso
			Pino Alto
			El Cedro
			El Choque
			El Bobal
			Buenos Aires
			Pozo Azul
			El Piloteo
			El Salitre
			El Mapa
			Paramillo
			Quesero
			Quebraditas
			Lomalta
			Charri
			Nemice
			Colorados
			El Charco
			La Cabaña
Casa Blanca			
La Chorrera			
Carizal			
El Molino			
Santa Barbara			
Los Cerezos			
El Hato			

			El Cajón
			La Hierbabuena
			Tibagota

Fuente: Excel

- Un sistema Creado, conformado por los embalses superficiales.

### 8.2.3 Vegetación

Gracias a las propiedades del suelo mencionadas anteriormente, es destacable que el municipio presenta características óptimas para el establecimiento de vegetación permanente, como plantaciones forestales protectoras o protectoras productoras. Adicional las particularidades climáticas, geológicas e hidrológicas hacen que el municipio tenga gran potencial forestal. Con extensas zonas de bosque y vegetación densa la flora y la fauna presente constituye una importante reserva ecológica de la región; se pueden encontrar en el páramo áreas de pajonales, frailejones, matorrales y algunos relictos de bosques alto andinos con una conservación impresionante. En total los páramos albergan alrededor de 400 especies de plantas vasculares como helechos y plantas con semillas.

Toda esta extensión de vegetación es el hábitat natural de gran variedad de aves, al menos unas 130 especies, como la pava andina y aquellas que acostumbran a vivir a baja altura, como el pato turrio. En las zonas más altas del municipio se pueden apreciar rastros de cusumbos y curíes, la fauna de vertebrados es más escasa, se conocen hasta el momento de 3 especies de peces, o especies de anfibios, unas 6 especies de reptiles y alrededor de 60 especies de mamíferos.

#### **8.2.4 Geología**

Subachoque se encuentra localizado como municipio sobre una zona en la que se incluyen las estructuras del Cuaternario, como depósitos aluviales y la Formación de la Sabana. Posee también estructuras de transición entre el Cuaternario y el Terciario, como son las Formaciones Tilatá y Guadalupe.

#### **8.2.5 Relieve**

El municipio se divide en dos áreas definidas según las planchas del IGAC:

- **Altiplano:** Zona en la que la altura promedio es de 2.500 m.s.n.m. En esta zona se observan planicies lacustres y terrazas altas, limitadas por cordones montañosos; está localizada al oriente del municipio que corresponde al noreste de la sabana de Bogotá.
- **Zona Montañosa:** En estas zonas encontramos alturas que varían entre los 2.600 y los 3.600 m.s.n.m.; las mayores alturas se presentan en el norte del municipio y en los límites oriental y occidental.

La zona montañosa tiene predominancia en geo-formas de origen fluvio-glaciar, fluvial y montañas con formas redondeadas, entre estas se destacan: Cerro o Cuchilla El Tablazo, Cerro La Soldadesca o El Carare, Cerro El Juaica, Cerro Carrasposo y Pedregoso (Alcaldía Subachoque, 2008).

## **8.3 Medio Socioeconómico**

### **8.3.1 Economía**

De las actividades económicas que se desarrollan en el municipio se destacan principalmente la agricultura (papa, zanahoria, arveja, maíz) y la ganadería, se encuentra además cultivos de árboles de pera y manzana y algunos cultivos de flores para exportación; de manera que es normal encontrar grandes extensiones de tierra destinadas a este tipo de actividades. La minería tenía una pequeña participación en la economía del municipio, sin embargo, desde la nueva delimitación de la Reserva Forestal de la Cuenca Alta del Rio Bogotá, el entonces Alcalde del municipio, el señor Ómar Salamanca aseguró *“No aceptamos la minería y si hay alguna solicitud nos opondremos”* tratando de mantener el municipio lo más verde y ecológico; de igual manera se rechaza en el municipio la industrialización de los campos ni en la urbanización de los mismos.

### **8.3.2 Población**

Para el año 2016, Subachoque tendría 16.435 habitantes según la proyección del (DANE, 2016) realizada con base en el censo realizado en el año 2005; para el 30 de junio de ese año el municipio contaba con una población total de 13.502 habitantes de los cuales 9.201 se encontraban en la cabecera municipal, y el resto de la población se esparcía en otras zonas del municipio tal como la muestra la tabla N°6. La densidad poblacional para el 2005, teniendo en cuenta que esta está referida al número promedio de habitantes del municipio en relación con la superficie física total de este, se calcula en 15,5 hab/m<sup>2</sup> para el área urbana y 0,05 hab/m<sup>2</sup> para el área rural.

Tabla 8. Censo General 2005 para el municipio El Rosal, Cundinamarca.

<b>Estimaciones de Población 1985 y proyecciones de población 2005-2020 total municipal por Área</b>					
<b>DP</b>	<b>DPNOM</b>	<b>DPMP</b>	<b>MPIO</b>	<b>2001</b>	<b>2016</b>
25	Cundinamarca	25769	Subachoque	12.639	16.435

*Fuente. (DANE, 2016)*

Para el año 2016 para el 30 de junio, según las proyecciones del (DANE, 2016), se estima que la población sea de aproximadamente 17.648 habitantes mostrando un importante crecimiento poblacional en el transcurso de esos 11 años.

- Población por grupos de edad: Las tablas 6 y 7 nos dan un balance general de la población del municipio El Rosal discriminada por 17 grupos de edad para los años 2005 y 2016; en ella se evidencia que el grupo más abundante son los niños y adolescentes, este dato puede ayudar a las autoridades competentes a enfocar los recursos del municipio a jardines y colegios y a actividades culturales propias de estas edades. Adicional vemos que es a penas cuando se llega al grupo de 40 a 44 años cuando la cantidad de personas por grupo de edad empieza a descender, de manera que podemos concluir que la población del Rosal es bastante joven, de modo que en ella se puede encontrar mano de obra y rendimiento laboral bastante alto.

Tabla 9. Población por grupos de edad municipio Subachoque, Cundinamarca.

<b>POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD</b>			
<b>ÁREA # 25769</b>	<b>CUNDINAMARCA, SUBACHOQUE</b>		
<b>Edad en grupos quinquenales</b>	<b>Sexo</b>		<b>Total</b>
	<b>Hombre</b>	<b>Mujer</b>	
0 a 4 años	702	673	1375
5 a 9 años	672	662	1.334
10 a 14 años	706	675	1.381
15 a 19 años	697	669	1.366
20 a 24 años	802	739	1.541



25 a 29 años	778	719	1.497
30 a 34 años	622	568	1.190
35 a 39 años	571	522	1.093
40 a 44 años	561	526	1.087
45 a 49 años	572	547	1.119
50 a 54 años	523	483	1.006
55 a 59 años	387	375	762
60 a 64 años	267	264	531
65 a 69 años	189	216	405
70 a 74 años	149	164	313
75 a 79 años	106	120	226
80 años o más	96	113	209
<b>Total</b>	<b>8400</b>	<b>8035</b>	<b>16435</b>

Fuente. (DANE, 2016)

### 8.3.3 Avalúos Catastrales Integrales

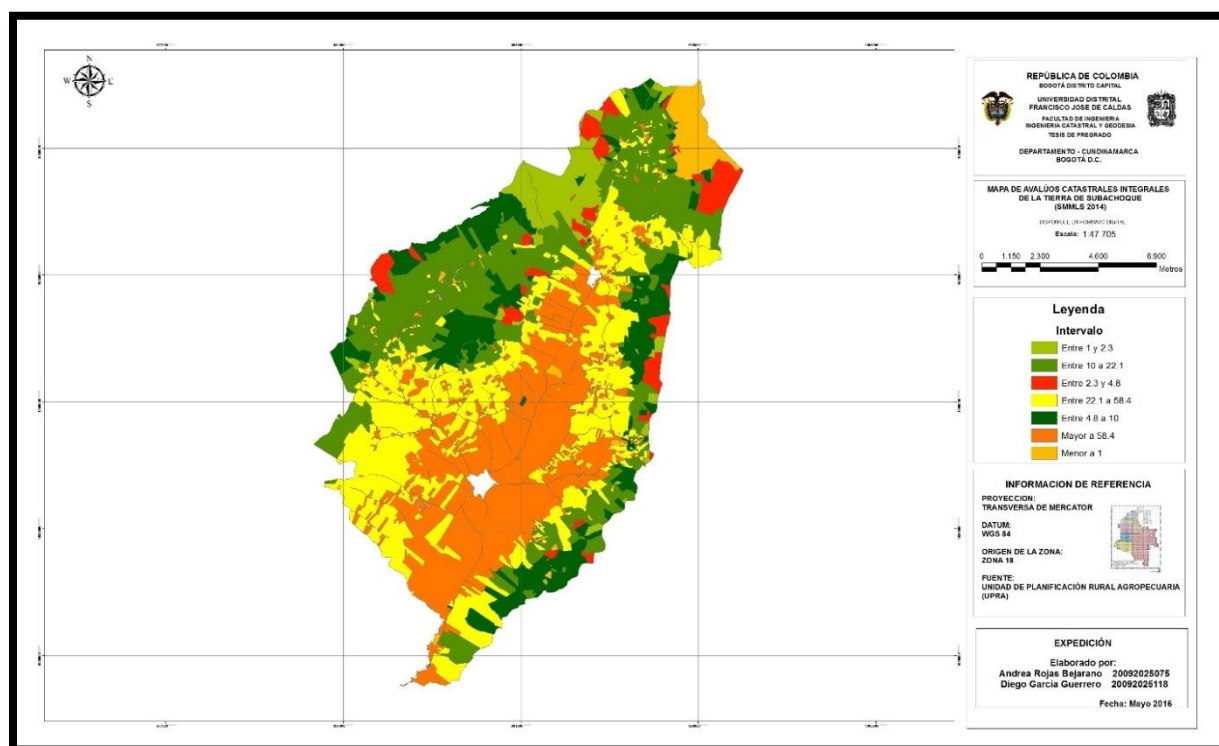


Figura 7. Avalúos Cástrales municipio de Subachoque año 2014

De la misma forma que en el mapa de avalúos catastrales integrales de la tierra del Rosal, se observa la agrupación de predios con intervalos del precio de la tierra bajos y altos, los predios con bajo nivel de avalúo se sitúan en las periferias o límites del municipio, parte occidental, norte y oriental de Subachoque, se evidencia que las principales actividades económicas se extendieron hacia la parte sur del departamento de Cundinamarca, influenciando el uso del suelo del Rosal. La parte central del municipio concentra no solo la parte urbana del mismo, si no predios dedicados a los cultivos de papa, zanahoria, arveja, maíz etc., motivo que desencadena la concentración de precios de la tierra más elevados, con valores de 22.1 SMMLS y superiores.

#### **8.3.4 Ocupación y uso del Territorio**

La producción pecuaria está principalmente centrada en ganado bovino (producción de carne y leche), con un aproximado de 6.230 cabezas de ganado de las cuales el 40% son para sacrificio (de engorde) y el 60% restante para la producción de leche; se estima que al menos 1.125 cabezas de ganado son machos y 5.105 hembras.<sup>1</sup> Se encuentran además especies en menor proporción de porcinos, caprinos y aves que son principalmente de producción y consumo de los habitantes de las zonas rurales del municipio, quienes cuentan con un rango de uno a cinco animales en instalaciones rudimentarias como porquerizas y galpones; las zonas municipales que presentan este tipo de producción familiar son las veredas de Galdámez, Tobal, Tibagota y el Valle (Latorre, 2011).

La producción de flores está a cargo de dos empresas con la obtención de variedades de: Rosas, Astromelias y Pompones; los cultivos se encuentran dispersos en las veredas de La Cuesta,

---

Santuario y Altania y general el 10% del empleo total de la población del municipio (Latorre, 2011).

El área cultivada total en el Municipio es de 2.160 Hectáreas de las cuales 2.100 hectáreas son de cultivos transitorios y 60 hectáreas de cultivos permanentes. A nivel económico el uso del suelo del municipio muestra un comportamiento ocupacional en el que el 40% es de uso ganadero, 40% para cultivos bajo cubierta y el sector agrícola y un 20% restante para otras actividades económicas. La tabla N°10 muestra un resumen numérico de la economía del municipio.

Tabla 10. Resumen Numérico Economía Subachoque.

Sector Económico	Ocupación en el Municipio	Datos			
		Hembras		Machos	
Ganadería	40%	5.105		1.125	
		Engorde		Leche	
		2.492		3.738	
		750 Ha		280 Ha	
Agricultura	40%	Cultivos Transitorios		Cultivos Permanentes	
		2.100 Ha		60 Ha	
		Arveja	Maíz	Zanahoria	Frutales
		750 Ha		280 Ha	
Minería	20%				
Industria					

Fuente: (Latorre, 2011)

## **9. Desarrollo metodológico**

### **9.1 Fases de levantamiento de uso y cobertura**

Se reconocen para este proyecto 10 fases para el levantamiento de uso y cobertura y se exponen a continuación:

#### **9.1.1 Preparación de un plan de trabajo**

Su fin principal es establecer de una manera organizada el proceso lógico con el que se va a dar marcha al estudio. Esto debe incluir la definición de objetivos, la descripción de los recursos en los que se incluye el personal, los equipos, los materiales, el financiamiento (si se requiere) y el tiempo. Se hace adicionalmente una descripción previa de los métodos y procedimientos que se van a utilizar y finalmente un cronograma de actividades en el que se especifique la labor y el tiempo empleado para cada una.

#### **9.1.2 Recopilación y análisis de la información preliminar**

En esta etapa se hace una recolección de la mayor cantidad de datos e información necesaria con relación con la cobertura y uso de la tierra, se hace de manera puntual para la zona que se decidió estudiar; así mismo se realiza una investigación preliminar sobre los tratamientos que se les dan a ciertas coberturas como los bosques, cultivos y la ganadería.

Esta información se puede obtener de variadas fuentes: entidades oficiales y organismos presentes en la zona, entidades privadas, estudios previos realizados, entre otros. Es importante que los datos recopilados cumplan con ciertas especificaciones de información como: fuente, escala, resolución, año de toma de la información, cartografía básica, entre otros.

### **9.1.3 Selección de las imágenes a utilizar**

Dependiendo de factores claves como la localización geográfica de la zona de estudio, el área que cubre la misma y el material adicional recopilado, es posible escoger el sensor que mejor se acomode a las necesidades del proyecto. Dentro de las características mínimas se requiere una imagen de buena resolución espacial, de precisión alta en su información radiométrica y cartográfica, una dimensionalidad espectral alta y que sea actualizada.

### **9.1.4 Reconocimiento general de campo**

El reconocimiento en campo, en especial, cuando las áreas son demasiado extensas, es muy importante; se realiza para poder tener un conocimiento global del área de estudio. En los recorridos de campo se verifican los datos obtenidos en otras fuentes y se adquiere información adicional relacionada con el tratamiento que se le da a las coberturas que son intervenidas por el hombre, por ejemplo, las destinadas a la actividad agrícola y pecuaria.

### **9.1.5 Elaboración de una leyenda preliminar**

En este punto se estudia la información que se recopiló tanto en las fuentes externas, como en el reconocimiento en campo y se elabora una leyenda que sea apropiada con el nivel de detalle especificado según el área de estudio; esta leyenda preliminar es una aproximación a las posibles coberturas y usos, debe ser flexible y fácil de modificar a medida que se avanza en el proyecto.

### **9.1.6 Selección de las áreas de muestreo para definir las claves de Cobertura y Uso de la tierra**

Las claves para la interpretación se definen como materiales de referencia diseñados para facilitar el reconocimiento rápido y preciso de la significación de objeto a partir de la imagen. En algunos

casos estas claves no se pueden tomar de manera generalizada, por ejemplo, en los cultivos depende de la ubicación del cultivo (planicie, montaña,), así entonces, la imagen reflejará estos aspectos diferenciables. Es entonces como a través de la experiencia adquirida a partir de la información recopilada y a la homogeneidad entre los objetos, es posible determinar las áreas de muestreo.

### **9.1.7 Interpretación preliminar**

La interpretación preliminar busca un primer trazado y delimitación del mayor número de coberturas y usos de la tierra establecidos en la leyenda preliminar. Se debe tener especial cuidado en que este primer acercamiento debe ser fácilmente identificable en las imágenes de acuerdo a las categorías o clases definidas.

Cada una de las clases que se entiende como definida se delimita sobre la imagen en una zona en la que se tenga certeza que la clase no se va a modificar posteriormente y se identifica con el respectivo símbolo que aparece en la leyenda que se definió anteriormente.

Cada unidad de mapeo debe ser correcta y cautelosamente analizada en la imagen haciendo el respectivo análisis de tono, tipo, forma, tamaño, ubicación y asociación.

### **9.1.8 Verificación en campo y ajuste de la leyenda**

A medida que se va realizando el proceso de clasificación, se van realizando visitas periódicas a campo para comprobar o mejor, para revisar la confiabilidad de la interpretación que se realizó previamente y para verificar aquellas zonas para las cuales se tenga duda para la clasificación. Además, la verificación se aprovecha para explorar si existen nuevas coberturas o clases que no se

hayan considerado en la leyenda preliminar, de manera que cuando sea necesario puedan agregarse nuevas categorías hasta la obtención de la leyenda definitiva

### **9.1.9 Interpretación final**

En esta fase se usan las imágenes satelitales para corregir la delimitación realizada en la interpretación preliminar, o si en el caso de que esta haya sido satisfactoria, completas las áreas que aún no han sido clasificadas. Al final de esta fase se da por terminado el proceso de identificación y delimitación de las clases o categorías para ser trasladadas a la cartografía básica.

De la correcta interpretación y manejo de la información depende la eficiencia del producto final; sin embargo, factores como la heterogeneidad de la zona de estudio, la experiencia del intérprete, el nivel de referencia de la zona, la resolución espacial de las imágenes y el grado de detalle cartográfico, pueden influir enormemente en el resultado final.

### **9.1.10 Transferencia de la información a un formato de salida**

Cuando culmina el proceso de clasificación y se tiene certeza de que la información es verídica, esta se transfiere a un mapa base en el que se define su escala para poder ser cuantificada. En este mapa debe tener los datos de la leyenda en el que se muestre cada una de las clases o categorías que pertenecen a un uso o cobertura. Posteriormente el intérprete revisa el producto final para realizar las correcciones pertinentes si las hubiese.

## 9.2 Proceso con las imágenes Landsat

### 9.2.1 Selección Imágenes

Las imágenes como se mencionó anteriormente, se descargaron de forma gratuita del servidor Earth Explorer. Se realizó la descarga de 4 imágenes del satélite landsat, dos corresponden al satélite landsat 5 del 29 de enero de 2001 (Path: 008 – Row: 057; Path: 008 – Row: 056) y dos de landsat 8 del 22 de diciembre de 2015. Para la selección de imágenes se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

Tipo de información necesitada: La zona de trabajo se encuentra en un área de predominio rural, característica de varias poblaciones de la sabana de Bogotá, cuenta con grandes extensiones de vegetación con una vocación orientada a las actividades agrícolas, además de pequeñas áreas urbanas. El uso de imágenes de satélite para el estudio, recae en la posibilidad de hacer seguimiento en diferentes lapsos de tiempo y la indiscutible posibilidad de estudiar las variaciones en el entorno. Las misiones Landsat cuentan con un histórico importante de imágenes en gran parte del territorio nacional, sus imágenes son de media resolución espacial, con vocación orientada al medio ambiente y el seguimiento de los recursos naturales.

Tipo de insumo: Otro aspecto importante es el acceso a la información. Las imágenes landsat brindan la posibilidad de una descarga directa, sin intermediarios, de forma gratuita y de fácil acceso a través de un servidor web, existen imágenes de otros satélites como SPOT, ASTER, ALOS que producen imágenes con muy buenas resoluciones espaciales, pero con costos altos. La calidad de las imágenes es buena para nuestros fines, en términos de resolución espacial y espectral, la primera para hacer seguimiento a grandes extensiones de vegetación y la segunda



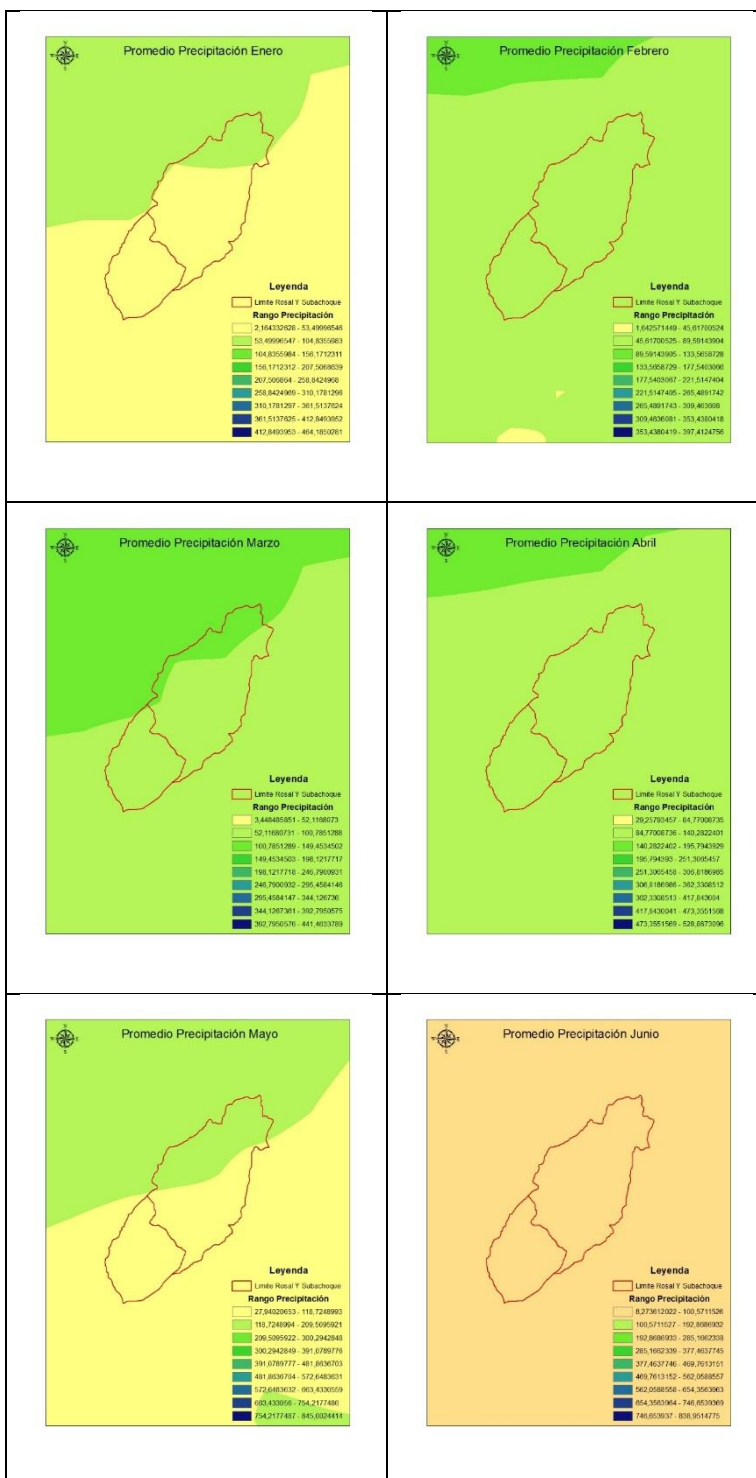
facilitando la categorización de los usos y coberturas presentes a raíz de la ayuda visual que brindan las respectivas firmas espectrales en la diferenciación de clases presentes en la imagen.

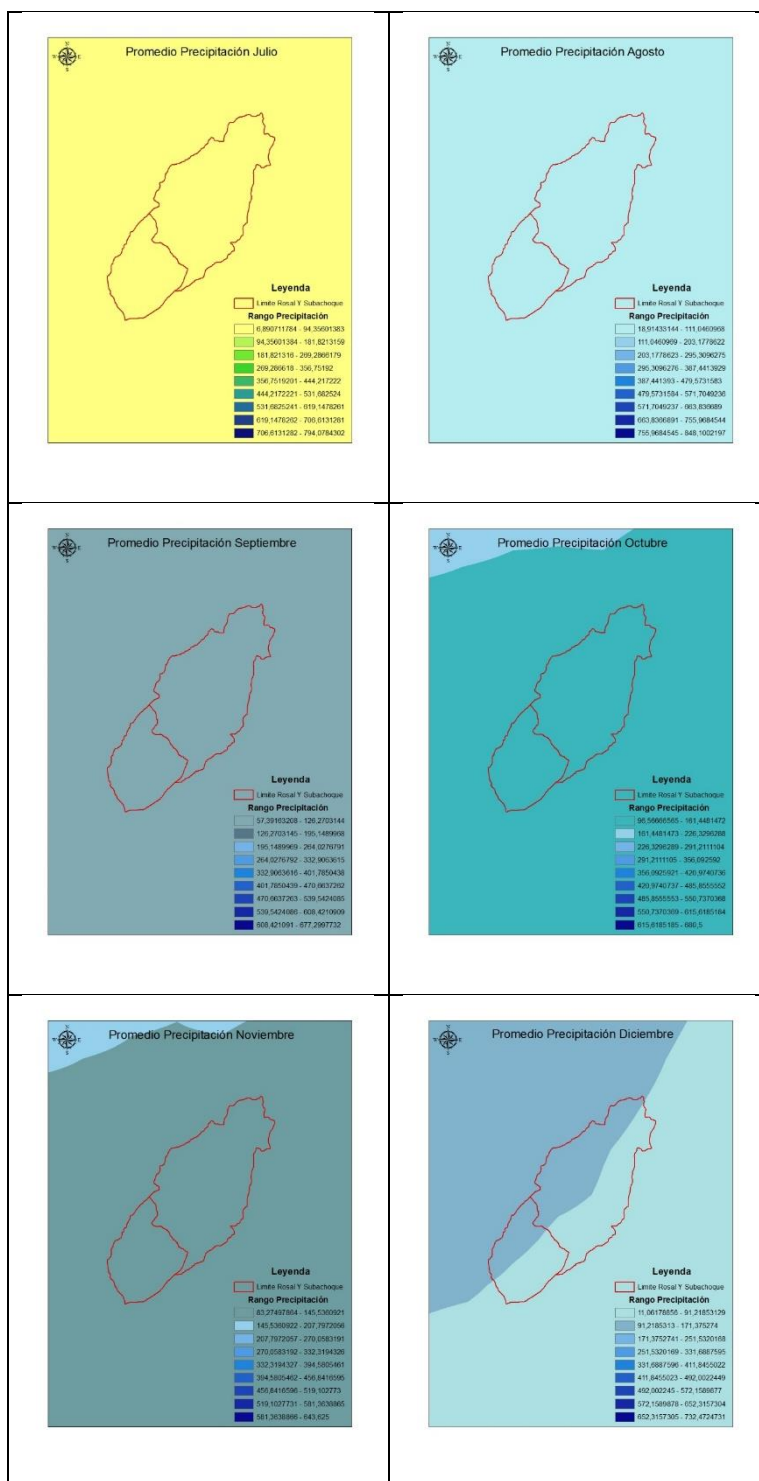
Área a trabajar: los municipios del Rosal y Subachoque no están contenidos en una sola imagen satelital, por lo que fue necesario la descarga de dos imágenes satelitales de la misma fecha, es decir dos imágenes para el año 2001 y dos imágenes para el año 2015. Posteriormente se realizó un mosaico que contuviera la zona de estudio.

Características de las imágenes: Para seleccionar las imágenes un factor fundamental fue la calidad de la información descargada; para el seguimiento del comportamiento de usos y coberturas de la tierra fue necesario que las imágenes no presentaran un alto porcentaje de nubes y sombras por razones claras. La imagen LT50080562001029XXX01 y LT50080572001029XXX01 del año 2001 tienen un porcentaje de nubes inferior al 10%, para el año 2015 el porcentaje de nubes de las imágenes LC80080562015356LGN00 y LC80080562015357LGN00 es también bajo. Otro aspecto relevante para la descarga fue un porcentaje mínimo de niebla o bruma, menor al 10%. El porcentaje de nubes es un importante criterio que depende en gran medida en la fecha en la que se realizó el análisis del cambio de cobertura de la zona, se deben trabajar dos periodos con las mismas características climáticas, para que al hacer el análisis espectral las coberturas presentes tengan un comportamiento similar. El periodo de descarga de imágenes fue realizado con ayuda del criterio resultante del siguiente cuadro:

*Resumen de lluvias del Rosal y Subachoque (1981-2010)*

Tabla 11. Promedio Precipitación 30 años.





Fuente: ArcGis 10.2.

Este es el resumen de lluvias mensual de los dos municipios, se determinaron por medio de la información descargada del catálogo de datos abiertos del IDEAM “corresponde a la suma de los

promedios mensuales de precipitación y al promedio de temperatura media de 30 años, considerado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como el número de años para establecer una media climatológica, en este caso 1981-2010” (IDEAM, 2015). Esta información fue graficada con el método de interpolación Kriging. Se observa que el periodo de menos lluvia se da en los primeros tres meses del año, con lluvias por debajo de 84,77mm, los meses más lluviosos en la zona son los de agosto, septiembre y octubre.

La fecha de captura de estas imágenes fue trascendental para la baja presencia de nubes, como se observa en la tabla N° 11 los periodos históricamente menos lluviosos son los primeros tres.

El periodo comprendido entre noviembre y enero en el Rosal y Subachoque, se considera como un periodo seco según la información de la tabla N°11 y de los registros históricos de un portal web (Meteored, 2015), según este portal meteorológico español, en enero de 2001 la temperatura promedio fue de 12.2°C con un promedio de lluvia de 36.3 mm (promedio de lluvia bajo), mientras que para el mes de noviembre del año 2015 la temperatura promedio fue de 14.5°C. Además de conocer el comportamiento climatológico del mes de captura de las imágenes, se analizó el comportamiento de los dos meses anteriores a las respectivas fechas de captura, observándose comportamientos similares respecto a la temperatura y a la precipitación. Las dos fechas de captura de las imágenes tienen los mismos patrones de comportamiento climatológico, siendo aptas para el análisis de las coberturas terrestres, facilitando la clasificación gracias a la paridad en el comportamiento de la vegetación en estos dos periodos de tiempo.

### 9.2.2 Unión de bandas

Para la unión de bandas es necesario conocer las características de cada una de ellas, con el fin de realizar una adecuada combinación de bandas y facilitar así la discriminación de las coberturas presentes.

#### *Imagen landsat 5*

Se utilizaron las 7 bandas, es decir las 6 bandas multiespectrales, la B1, B2 y B3 que corresponde al azul, al verde y al rojo respectivamente, la B4 que es la infrarrojo cercano1, la B5 infrarrojo cercano2 y la banda 7 correspondiente al infrarrojo medio. También se unió la banda termal, banda 6 que corresponde al infrarrojo térmico, a continuación se presenta la relación de las bandas escogidas:

Tabla 12. Bandas escogidas para unión.

Archivos	Banda	Layer
LT50080562001029XXX01_B1	1	1
LT50080562001029XXX01_B2	2	2
LT50080562001029XXX01_B3	3	3
LT50080562001029XXX01_B4	4	4
LT50080562001029XXX01_B5	5	5
LT50080562001029XXX01_B6	6	6
LT50080562001029XXX01_B7	7	7

Fuente: Excel 2010

#### *Imagen Landsat 8*

La imagen de trabajo se puede apreciar en la figura N°2 y tiene un ancho de imagen de 3119 pixeles y un alto de 3543, para un total de 11'050.617 de pixeles de los cuales son útiles aproximadamente el 70% ya que el 30% restante corresponden a niveles digitales iguales a cero. De las 11 bandas totales se decidió utilizar únicamente 7, despreciando las bandas termales, la

banda Cirrus y la de Aerosol Costero, a continuación, se presenta la relación de las bandas escogidas.

Tabla 13. Bandas escogidas para unión.

Archivos	Banda	Layer
LC80080562015356LGN00_B2	2	1
LC80080562015356LGN00_B3	3	2
LC80080562015356LGN00_B4	4	3
LC80080562015356LGN00_B5	5	4
LC80080562015356LGN00_B6	6	5
LC80080562015356LGN00_B7	7	6
LC80080562015356LGN00_B8	8	7

Fuente: Excel 2010

### 9.2.3 Corrección de Radiancia espectral y Reflectancia

Las imágenes de satélite son producto de la captura de una porción de tierra en un tiempo determinado, en la captura de cada imagen intervienen diversos factores que deben ser corregidos.

Los sensores satelitales capturan la información de la cobertura de la tierra obtenida a partir de la intensidad de radiación electromagnética, misma que proviene de la luz del sol reflejada sobre la superficie terrestre, sumada a la energía dispersada y reflejada por la atmósfera, conocida como radiancia (Mora Zamora, Aguilar Arias, & Vargas Bolaños, 2014, p.44).

Para las correcciones atmosféricas se hizo uso de una herramienta de Erdas Imagine ATCOR, teniendo en cuenta aspectos como la fecha de toma, las bandas a correlacionar, parámetros de escala, el sensor (Landsat 5 y landsat 8), el archivo de calibración etc.

### 9.2.4 Elaboración de mosaico

El área de trabajo como se mencionó, no se encuentra ubicada en una sola imagen, por lo que fue necesario hacer uso de dos imágenes de satélite por fecha. Al unir las dos imágenes satelitales, el

área formada es de aproximadamente  $34225 \text{ Km}^2$ . El área formada es muy grande para nuestro enfoque, por lo que fue necesario un recorte que contuviera la zona de estudio, además se decidió incluir otros municipios bajo el criterio de presentar un comportamiento similar en las coberturas del suelo, esto será explicado más adelante.

### **9.2.5 Recorte de la zona de trabajo**

Nuestro foco de estudio, el Rosal y Subachoque comprenden un área aproximada de  $299,72 \text{ Km}^2$ . Para realizar la clasificación supervisada se eligieron los dos municipios de interés, más algunos municipios aledaños, con el fin de tener como mínimo un área de trabajo formada por al menos 10.000.000 píxeles, este criterio facilita la clasificación, aumentando los polígonos de entrenamiento. Lo expuesto es posible por el comportamiento de los municipios de la sabana, que presentan características similares en las respuestas espectrales, es decir en las coberturas del suelo. La imagen se recortó eligiendo los siguientes municipios: el Rosal, Subachoque, Madrid, Tenjo, Tabio y Zipaquirá, para formar finalmente un área de trabajo aproximada de  $815,06 \text{ Km}^2$ .

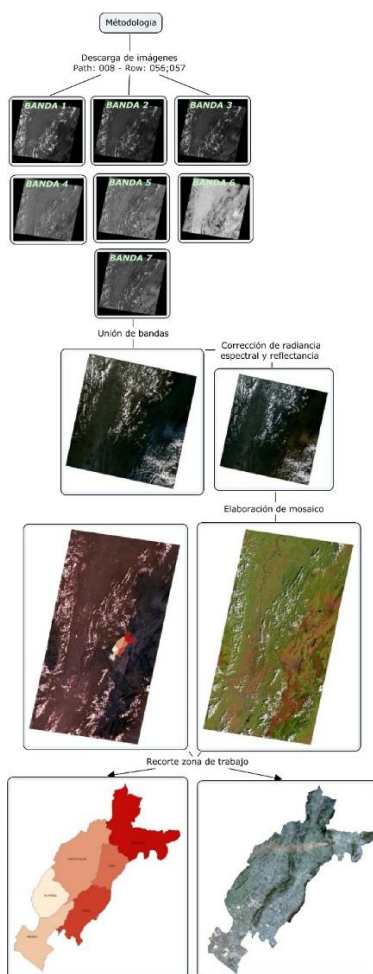


Figura 8. Proceso con las Imágenes Landsat

### 9.2.6 Sistema de clasificación de cobertura

En primera medida expondremos que la clasificación de imágenes es el proceso mediante el cual se agrupan un número finito de píxeles con características similares con respecto a sus niveles digitales en clases individuales o categorías de datos; dependiendo el tipo de información que se maneje, estas clasificaciones se pueden asociar a elementos conocidos del terreno o representar áreas con rasgos de interés. En el caso particular estudiaremos las clasificaciones de cobertura y uso del suelo para dos municipios del Departamento de Cundinamarca – Colombia.



La cobertura es el tipo de material presente en el paisaje (agua, arena, tierras húmedas, vías, construcciones, cultivos etc.) (Jensen, 2005), el conocimiento de este tipo de aspectos sobre la tierra y su correcta clasificación ofrece posibilidades tangibles para resolver problemas como: deforestación, crecimiento sostenible y protección de los recursos hídricos.

Colombia es un país con un amplio espectro de coberturas de suelo, la diversidad del país hace que esto sea posible; de manera que la clasificación para una zona del país puede variar enormemente si se compara con la clasificación de otra zona. Es así como las clases de interés que se van a escoger para el lugar de estudio debe ser precisa y basarse en estudios previos, observación detallada en campo y una correcta interpretación visual; las clases deben pertenecer a un sistema de clasificación preestablecido, que para el caso particular de Colombia bajo los criterios del Instituto Geográfico Agustín Codazzi es la metodología CORINE LAND COVER.

El sistema Corine Land Cover se adoptó en Colombia en el marco del programa de apoyo y la colaboración prestada por el Fondo Francés para el Medio Ambiente (FFEM), la Embajada de Francia en Colombia, el Instituto Geográfico Nacional de Francia (ING) y ONF Andina Colombia; con el fin de promover una metodología unificada y estandarizada para el contexto colombiano en relación a coberturas de la tierra.

La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a escala 1:100.000 como principal resultado de esta tarea, el país cuenta con la “Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia” (IDEAM, 2010).

### 9.2.7 Descripción de métodos utilizados

#### *Clasificación supervisada*

Como se menciona anteriormente la clasificación se da a partir de una correcta categorización de las capas, de manera que resulta importante tener cierto conocimiento del terreno, es decir, conocer a priori las coberturas presentes en la zona de interés, esto se logra, en el mejor de los casos, con una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas y satelitales, cartografía y referencias profesionales y locales. Estas clases o categorías deben caracterizarse en función del conjunto de variables mediante la medición de las mismas en individuos cuya pertenencia a una clase u otra no genere dudas; esto se consigue con el uso de polígonos de entrenamiento. Así pues es imperativo tener un análisis estadístico y visual previo de las bandas que se usarán para la clasificación. El proceso de clasificación se divide de manera general en dos partes, se comienza con la fase de entrenamiento en la que el usuario da al software criterios de decisión para su posterior clasificación, que es la segunda parte.

***Entrenamiento Supervisado:*** Es el proceso en el que el intérprete selecciona píxeles que representan patrones o rasgos de las coberturas que el reconoce, de manera que este proceso es altamente controlado por el intérprete; así que es posible que la persona pueda ir entrenando al sistema computacional para identificar píxeles que hacen parte de una categoría u otra gracias a sus características similares. Si el sistema está correctamente entrenado, es posible que al final las clases resultantes serán las mismas categorías de datos que originalmente el intérprete identificó previamente (ERDAS, 2011).

Esta actividad se basa en los criterios pictórico-morfológicos de la imagen, como conocemos algunos de ellos son: textura, forma, tamaño, etc. La selección errónea de estas muestras se deriva

igualmente en resultados e interpretaciones erróneas; de manera que resulta importante y casi imperativo la buena interpretación, pues es a partir de ello que se calculan los Niveles Digitales (ND) que hacen parte de una clase u otra.

**Selección de Muestras de Entrenamiento:** Aunque no necesariamente las muestras de entrenamiento requieren tener una gran cantidad de píxeles, si se requiere una alta precisión a la hora de escoger cuales de estos píxeles son los que pertenecen a una determinada clase o categoría. Este proceso se puede realizar a partir de una capa vectorial, definiendo un polígono en la imagen o identificando una muestra de entrenamiento de píxeles contiguos con características espectrales similares, con la digitalización de polígonos definidos por el usuario o el uso de una capa raster temática de la zona de trabajo que ya ha sido previamente definida a partir de una clasificación supervisada.

Tabla 14. Comparación de Muestras de Entrenamiento.

Método	Ventajas	Desventajas
<b>Polígonos Digitalizados</b>	Coordenadas del mapa precisas, representa información conocida del terreno.	Puede sobrestimar la varianza de la clase, consume tiempo.
<b>Polígonos Definidos por el Usuario</b>	Alto grado de Control por parte del usuario.	Puede sobrestimar la varianza de la clase, consume tiempo.
<b>Pixel Semilla</b>	Apoyado automáticamente, menos tiempo.	Puede sobrestimar la varianza de la clase, consume tiempo.
<b>Capa Raster Temática</b>	Permite una clasificación interactiva.	Debe definirse previamente la capa temática.

Fuente: (ERDAS, 2011)

**Firmas:** Cuando el proceso de entrenamiento finalmente concluye, el resultado es un conjunto de firmas que define una muestra de entrenamiento o un conglomerado. Cada firma es entonces la correspondencia a una clase o categoría, estas se definen mediante el uso de una regla de decisión. Estas firmas pueden ser paramétricas o no paramétricas. Una firma paramétrica se basa en

parámetros estadísticos, por ejemplo: media, mediana, matriz de varianza y covarianza; este tipo de firmas pueden usarse para entrenar un clasificador basado en las estadísticas para definir las clases. Mientras que una firma no paramétrica no se basa en estadísticas sino en objetos o figuras tales como rectángulos, triángulos u otro tipo de polígonos, dentro del espacio de características de la imagen. Para un tipo de clasificación no paramétrico se usa un conjunto de firmas igualmente no paramétricas para asignar cada pixel a una clase dependiendo de su localización espacial (Kloer, 1994).

En algunas ocasiones se recomienda repetir del proceso de entrenamiento varias veces antes de conseguir producir las firmas deseadas, sobre todo en los casos en los que luego de la clasificación se encuentran pixeles que no se identifican a ninguna de las firmas definidas, de manera que manualmente se debe asignar estos pixeles a alguna de las clases mediante un nuevo entrenamiento (ERDAS, 2011).

**Regla de decisión Paramétrica:** Al momento de usar una regla de decisión paramétrica, cada pixel se asigna a una clase dado que el espacio de decisión paramétrico es continuo, esto debido a que las reglas de decisión paramétricas están entrenadas por las firmas paramétricas, de manera que las firmas son definidas por el vector de medias y la matriz de covarianza para los Niveles Digitales de los pixeles pertenecientes a la firma. Dentro de las reglas de decisión paramétricas encontramos:

**Distancia Mínima:** Es también conocida como distancia espectral y calcula, como su nombre indica, la distancia espectral entre el vector de medias de los dos pixeles producto de la comparación, es decir el del vector candidato y el pixel perteneciente a la firma. La figura N°9 nos deja ver un ejemplo de cómo se realiza esta clasificación al comparar un pixel candidato con otros tres pixeles pertenecientes cada uno a una firma diferente.

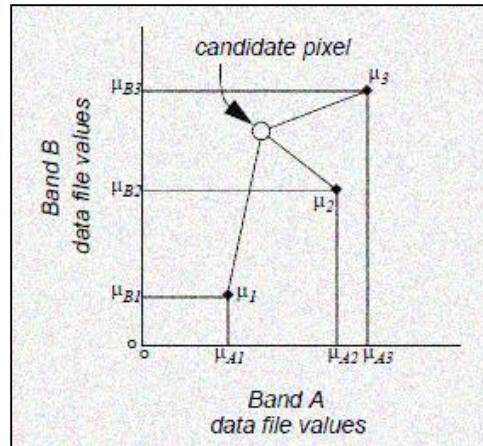


Figura 9. Regla de decisión de Mínima Distancia. Fuente: (ERDAS, 2014)

Se decide a que firma pertenece mediante el cálculo espectral de cada una de las firmas, y aquella que arroje el menor valor de distancia será la clase asignada, esto se realiza mediante la siguiente formula (Swain, 1978):

$$SD_{xyc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{ci} - \mu_{xyi})^2}$$

Ecuación 7. Distancia espectral del píxel

Donde:

$n$  = Número de bandas

$i$  = Banda  $i$

$c$  = Clase Particular

$X_{xyi}$  = Nivel Digital del píxel  $x,y$  en la banda  $i$

$\mu_{ci}$  = Media de los Niveles Digitales en la banda  $i$  para la muestra de la clase

$SD_{xyc}$  = Distancia espectral del píxel  $x,y$  a la media de la clase  $c$

**Distancia Mahalanobis:** Aunque es similar a la regla de decisión de mínima distancia, se calcula a través de la matriz de covarianza. *“La varianza covarianza se calculan para que los conglomerados que varían bastante conduzcan a clases que varían de manera similar y viceversa”* (ERDAS, 2014). En las áreas urbanas los pixeles tienen variaciones notables, así los pixeles que están clasificados de una manera adecuada, pueden estar más lejos de la media que aquellos de una clase para agua, por ejemplo, que en términos generales no es una firma que varíe mucho (Swain, 1978). Se usa la siguiente ecuación para su cálculo, asignando el pixel a la clase  $c$  para la que el valor  $D$  sea menor.

$$D = (X - M_c)^T (Cov_c^{-1})(X - M_c)$$

Ecuación 8. Distancia Mahalanobis

*Donde:*

$D$  = Distancia Mahalanobis

$c$  = Clase  $c$

$X$  = El vector de medias del pixel candidato

$M_c$  = El vector medio de la firma de la clase  $c$

$Cov_c^{-1}$  = Inversa de la matriz de covarianza

$Cov_c$  = Matriz de covarianza de los pixeles de la firma  $c$

$T$  = Función traspuesta

**Máxima Probabilidad:** Se conoce también como clasificador Bayesiano y es una variación de la propia regla de máxima probabilidad, se usa cuando el usuario tiene un conocimiento previo de que las probabilidades para todas las clases no son iguales y se debe especificar factores de peso para clases particulares (Hord, 1982). En el caso que no se tenga este conocimiento, se recomienda dejar los pesos como predefinidos como se muestra en la siguiente ecuación:

$$D = \ln(a_c) - [0.5 \ln(|cov_c|)] - [0.5 (X - M_c)^T (Cov_c^{-1})(X - M_c)]$$

Ecuación 9. Distancia Mahalanobis

Donde:

$D$  = Distancia Mahalanobis

$c$  = Clase  $c$

$X$  = El vector de medias del pixel candidato

$M_c$  = El vector medio de la firma de la clase  $c$

$Cov_c^{-1}$  = Inversa de la matriz de covarianza

$Cov_c$  = Matriz de covarianza de los pixeles de la firma  $c$

$|Cov_c|$  = Determinante de la matriz de covarianza de los pixeles de la firma  $c$

$a_c$  = Porcentaje de probabilidad con que un pixel candidato es miembro de la clase  $c$

$\ln$  = Función logaritmo natural

$T$  = Función traspuesta

**Regla de decisión no Paramétrica:** Como es lógico las reglas de decisión no paramétricas están definidas por las firmas no paramétricas, de modo que como no están basadas en estadísticas, entonces cabe mencionar que es independiente de las propiedades de los datos. La asignación no paramétrica asigna el pixel a una u otra clase si este se encuentra dentro o fuera de la frontera de la firma no paramétrica. Como reglas de decisión no paramétricas podemos remitirnos a la del paralelepípedo o al espacio de características (ERDAS, 2014):

**Paralelepípedo:** Para esta regla de decisión lo que efectúa el sistema es una comparación del pixel candidato con los límites superior e inferior de una serie de características en las que se encuentran:

- El mínimo y máximo valor de los niveles digitales por cada banda de la firma específica.
- La media de cada banda + o – un número de desviaciones estándar

- Cualquier límite que el usuario especifique, esto con base en un conocimiento a profundidad de los datos que se manejan.

Si los pixeles se encuentran dentro de los límites establecidos, son asignados a esa categoría o firma. La figura 8 muestra un ejemplo en dos dimensiones del método de decisión, en esta se muestran los rectángulos que se forman para cada una de las clases, estos rectángulos son teóricamente regiones que están dentro de los límites de cada barrera y se conocen como paralelepípedos.

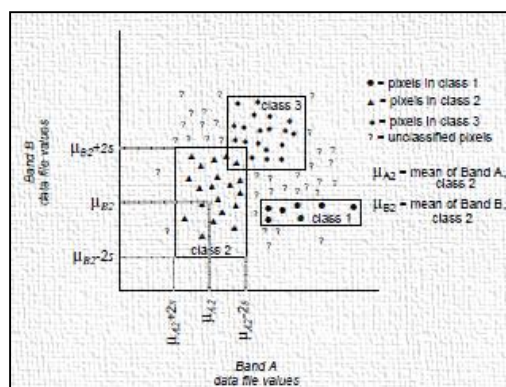


Figura 10. Regla de decisión del paralelepípedo. Fuente: (ERDAS, 2014)

**Espacio de Características:** Esta determina si un pixel está dentro de una firma en la imagen del espacio de características basado en su Nivel Digital, en esta regla de decisión se pueden formar cualquier tipo de geometrías para establecer un espacio característico, tal como lo muestra la figura N°9.



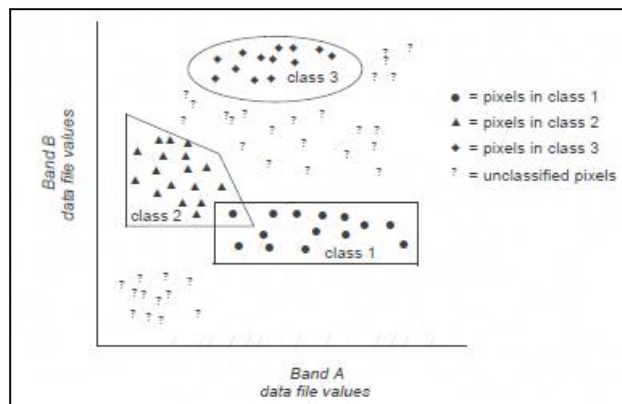


Figura 11. Regla de decisión de Espacio de Características. Fuente: (ERDAS, 2014)

**Esquema de Clasificación:** De manera general, la clasificación se realiza con un conjunto de clases predefinidas en mente, es conjunto se conoce como esquema de clasificación; el propósito de este esquema es proporcionar una estructura para organizar y categorizar la información que puede extraerse de los datos (Jensen, 2005). Un esquema adecuado de clasificación debe incluir clases de clasificación que son diferenciables en los datos disponibles, generalmente la mayoría de los esquemas son de orden jerárquico que pueden describir un área de estudio en varios niveles de detalle.

**Separabilidad:** Es una medida estadística que mide la distancia entre dos firmas, esta se usa para evaluar que tan similares son dos firmas y que tan probable es entonces el riesgo de error del software a la hora de elegir si un nivel digital pertenece a una u otra clase; para su evaluación se pueden utilizar métodos gráficos que proporcionan una primera aproximación al análisis de separabilidad, o métodos numéricos que permiten tomar la decisión final sobre si por ejemplo una clase es discriminable o no.

Los métodos numéricos son muy variados, encontramos separabilidad por distancia de Minkowski, distancia de Mahalanobis, distancia euclidiana, divergencia, divergencia transformada, Jefferies-Matusita, entre otras. Cada una tiene una expresión matemática y evalúa la separabilidad de una forma diferente; se expondrán a continuación las tres últimas que se consideran como aquellas más relevantes o las más utilizadas.

### **Divergencia:**

La fórmula utilizada para calcular es la siguiente (Swain, 1978):

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_{ij} - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1}) \right) + \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T \right)$$

Ecuación 10. Divergencia

*Donde:*

$ij$  = Firmas o Clases a evaluar

$C_i$  = Matriz de Covarianza de la Firma  $i$

$\mu_i$  = El Vector Media de la Clase  $i$

$\text{tr}$  = La Función Algebraica Traza

$T$  = Función Traspuesta

### **Divergencia Transformada:**

La fórmula que se utiliza para el cálculo de la divergencia transformada (DT) es (Swain, 1978):

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1}) \right) + \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T \right)$$

Ecuación 11. Divergencia transformada

*Donde:*

$ij$  = Firmas o Clases a evaluar

$C_i$  = Matriz de Covarianza de la Firma  $i$

$\mu_i$  = El Vector Media de la Clase i

$tr$  = La Función Algebraica Traza

$T$  = Función Traspuesta

Según (Jensen, 2005), esta forma de evaluación de separabilidad “*da un crecimiento exponencial ponderado con el incremento de las distancias entre las clases*”. La separabilidad entre una firma y otra se encuentra en rangos entre 0 y 2000 siendo 0 una separabilidad nula, es decir, las firmas evaluadas son idénticas y 2000 una separabilidad completa. Para realizar el análisis de estos valores como regla general se dice que, si los valores están entre 1700 y 1900, la separabilidad es moderadamente buena, por encima de 1900 se puede separar las clases y por debajo de 1700 la separabilidad es mala.

### **Jeffries-Matusita:**

Para la separabilidad usando Jeffries-Matusita (JM) usamos la fórmula (Swain, 1978):

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_i - \mu_j)^T \left( \frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{|C_i + C_j|/2}{\sqrt{|C_i| |C_j|}} \right)$$

Ecuación 12. Jeffries Matusita

*Donde:*

$i$  y  $j$  = Firmas o Clases a evaluar

$C_i$  = Matriz de Covarianza de la Firma i

$\mu_i$  = El Vector Media de la Clase i

$\ln$  = La Función Logaritmo Natural

$|C_i|$  = Determinante de  $C_i$  (álgebra matricial)

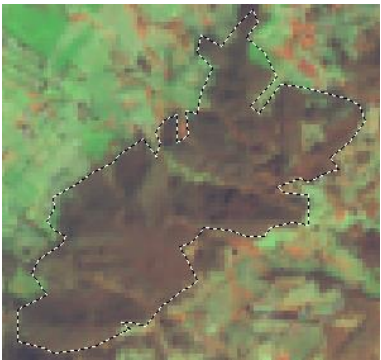

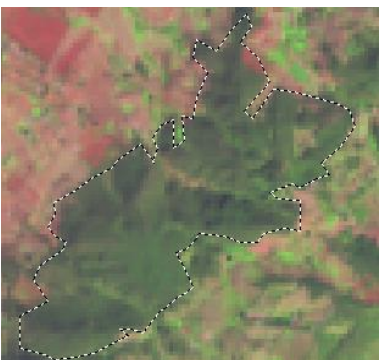
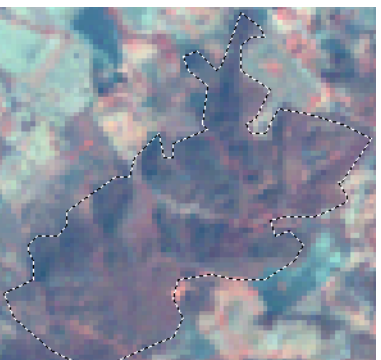
Para este caso, la distancia JM tiene un comportamiento de saturación en la medida en que el valor de separabilidad aumenta, tal como en el caso de la divergencia transformada, sin embargo, computacionalmente, la separabilidad Jeffries-Matusita no es tan eficaz como la divergencia transformada (Jensen, 2005).

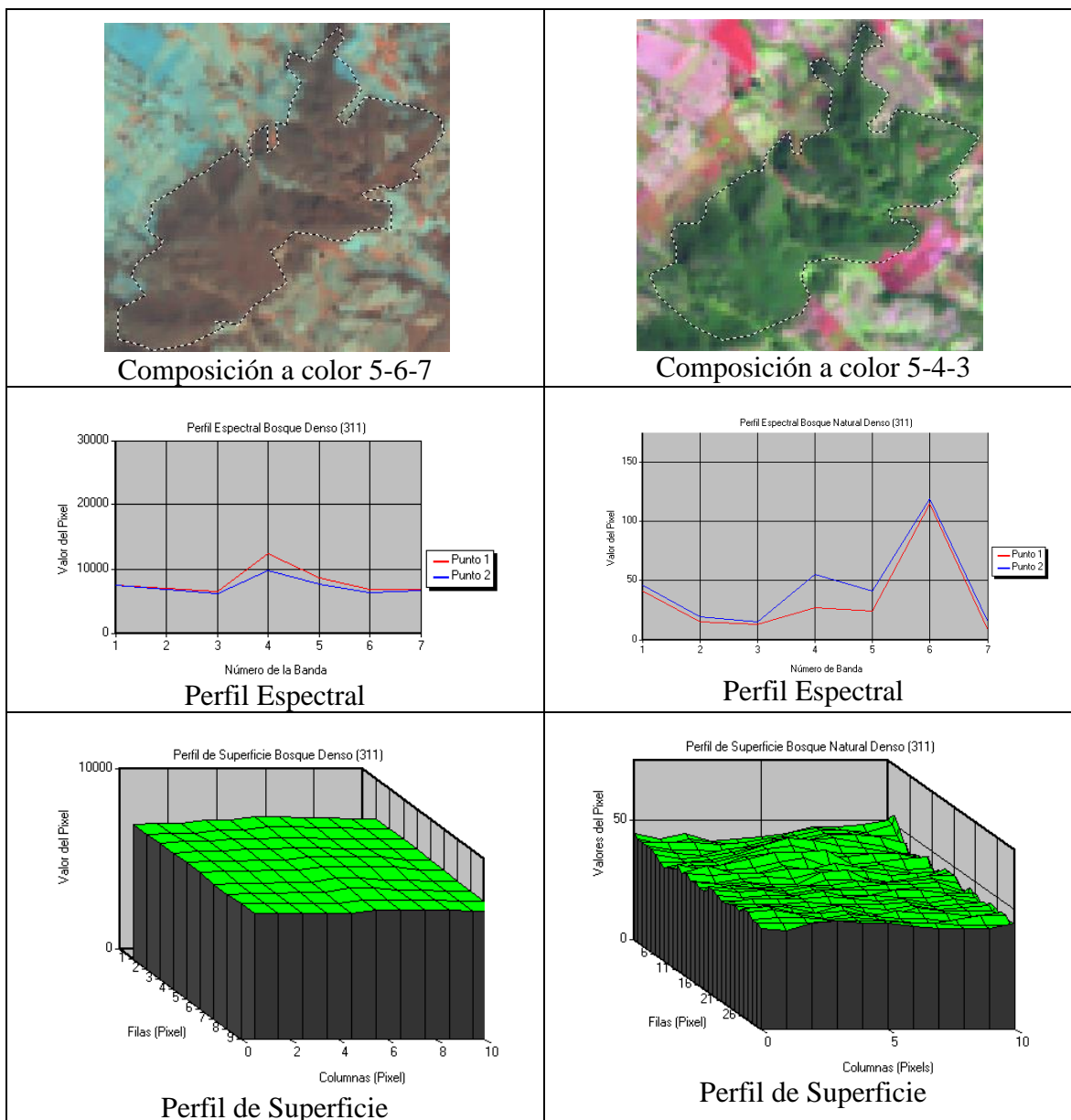
## 10. Identificación Pictórico Morfológica y comportamiento espectral de las coberturas del suelo

### 10.1 Coberturas

#### 10.1.1 Bosque Natural Denso

Tabla 15. Bosque Natural Denso

Landsat 8	Landsat 5
 <p data-bbox="344 1459 696 1493">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="927 1459 1279 1493">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="344 1860 696 1894">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="927 1860 1279 1894">Composición a color 4-2-1</p>



Fuente: ERDAS 2013

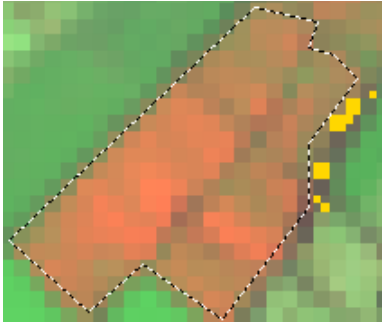
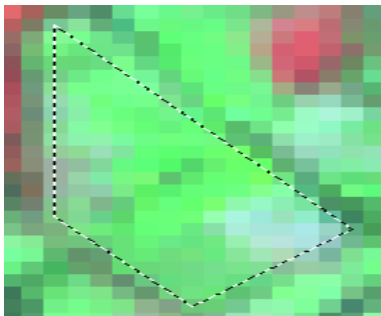
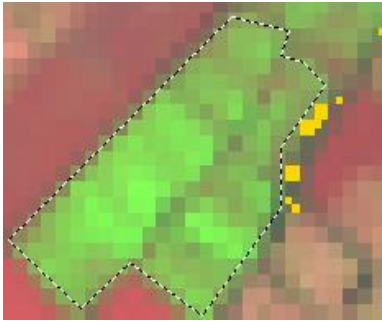
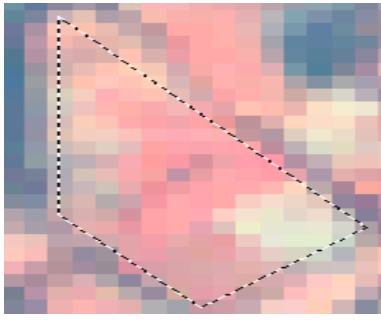
Corresponden a áreas de vegetación de tipo arbóreo caracterizado por alturas superiores a los 15 metros y que se encuentran en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos. Cubre un área muy pequeña del área de estudio; su perfil espectral nos deja ver que, aunque ambos puntos pertenecen al mismo tipo de bosque tiene variaciones en la banda del infrarrojo, pero en términos

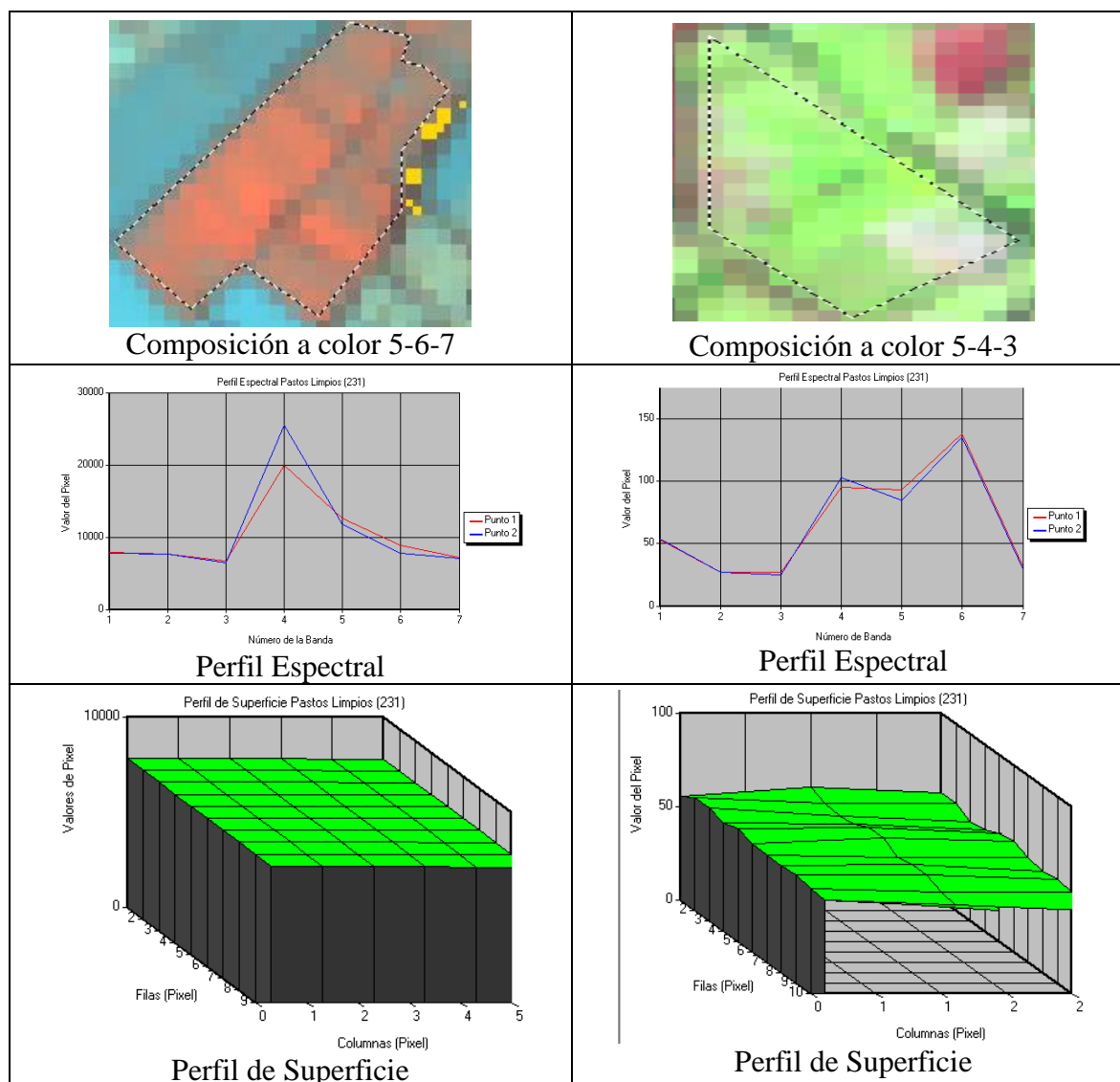
generales tiene baja reflectividad en las bandas de los visibles y los infrarrojos medios y una alta reflectividad en la banda del infrarrojo cercano (Chuvienco, 1995).

Pictórico morfológicamente a nivel de forma se caracteriza por presentar formas irregulares, esto puede explicarse fácilmente a la ininterrumpida acción de tala de bosque por parte de la mano del hombre; no presenta un patrón definido pues su localización es variada dentro de la zona de estudio. De textura fina, con rugosidades muy bajas; el tono del bosque varía según la composición a color, por ejemplo, para composiciones a color RGB 5-6-4 toma tonalidades marrones, y para Landsat 5 en una composición a color RGB tiende a presentar tonalidades verdes oscuras en composiciones a color RGB 7-4-3 y 4-5-3.

### 10.1.2 Pastos Limpios

Tabla 16. Pastos Limpios

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1396 656 1430">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1396 1240 1430">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1766 656 1799">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1766 1240 1799">Composición a color 4-2-1</p>



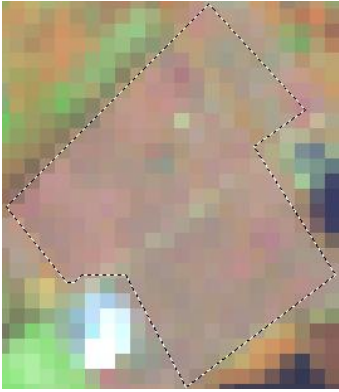



Fuente: ERDAS 2013

La realización de prácticas de manejo como limpieza y fertilización hacen imposible la aparición de otro tipo de coberturas; amén a la vocación pecuaria propia de una de las principales actividades económicas de la zona de estudio, cubre un importante espacio en los municipios. El perfil espectral muestra una baja reflectividad en las bandas del espectro visible y a nivel de las bandas 7 y 8, una media reflectividad en la banda 6 perteneciente al infrarrojo y una alta reflectividad en el infrarrojo medio; este comportamiento puede asociarse al manejo que se le da a la cobertura con el uso de productos químicos que alteran su pigmentación natural.

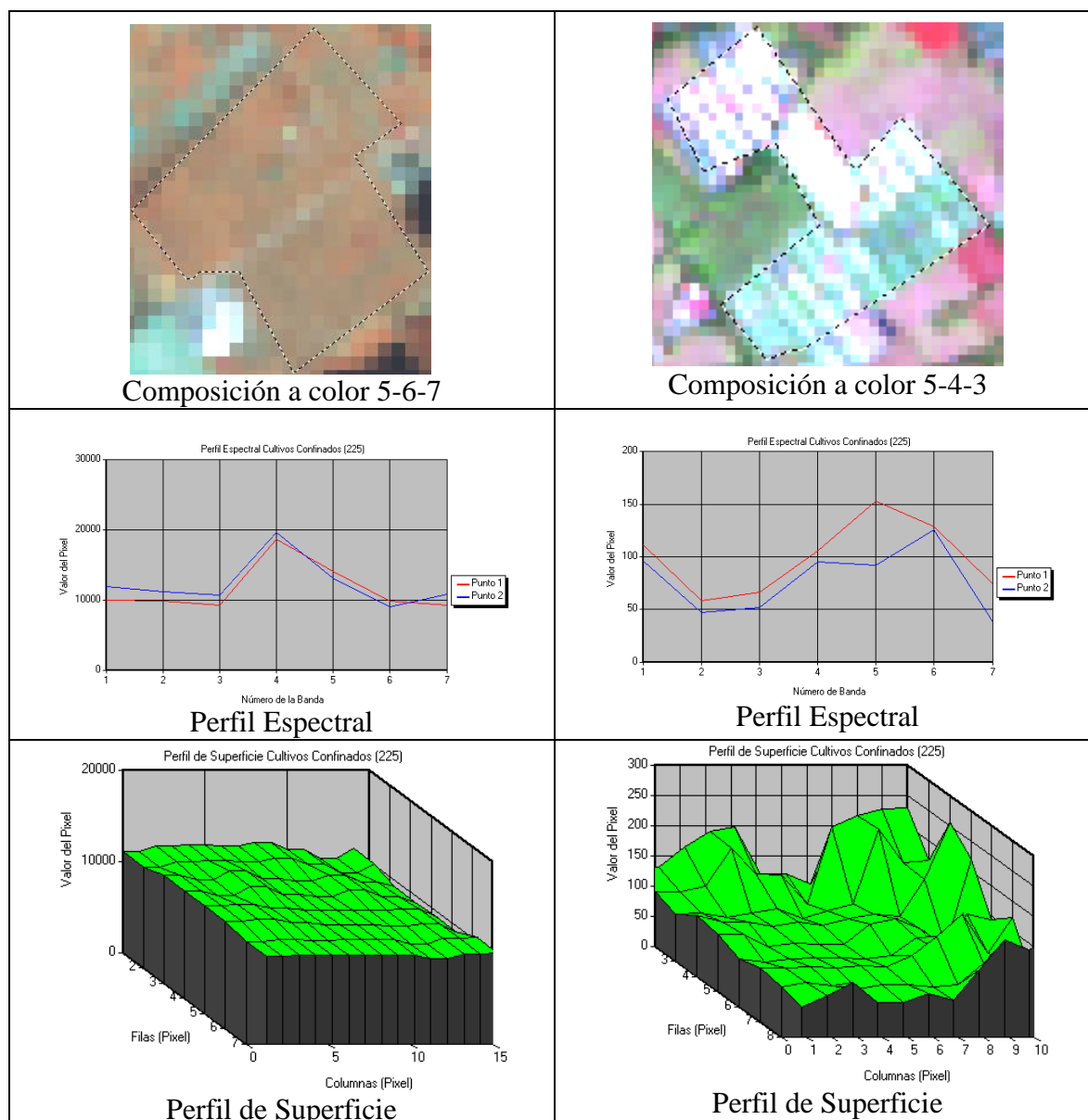
Pictórico morfológicamente, a nivel de forma, presentan formas regulares debido a la parcelación con fines pecuarios, así mismo mantienen un patrón definido; su tamaño no es particularmente extenso, suele tener tamaños pequeños. Su textura es fina y homogénea. Para la composición a color RGB 6-5-4 de Landsat 8 se evidencian tonos verdes para esta cobertura que se asocia a la alta reflectividad de la banda 4; por su parte la combinación a color RGB 4-2-1 en Landsat 5 muestra colores rosados que pueden ser consecuencia de la reflectividad alta en la banda 6.

### 10.1.3 Cultivos Confinados

Tabla 17. Cultivos Confinados

Landsat 8	Landsat 5
 <p data-bbox="310 1220 656 1255">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1220 1240 1255">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1665 656 1701">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1665 1240 1701">Composición a color 4-2-1</p>





Fuente: ERDAS 2013

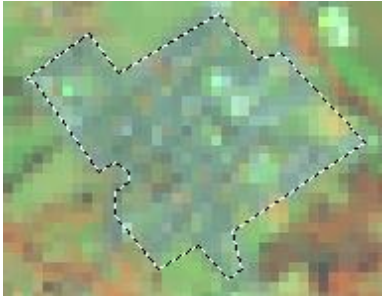
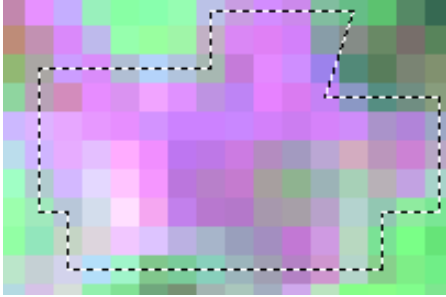

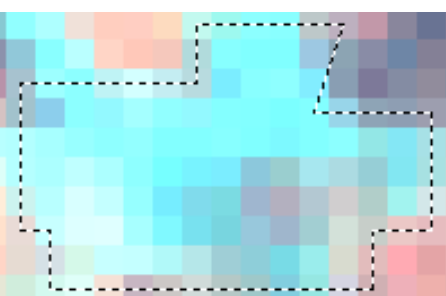
Los cultivos confinados son una modalidad particular de cultivos en áreas reducidas y limitadas, muchas veces bajo cobertizos en condiciones intensivas de manejo y explotación (CIAF, 2005). En la zona de estudio se ven extensiones de este tipo de cultivos que son principalmente para la producción de flores, sobre todo en la zona sur del área de estudio.

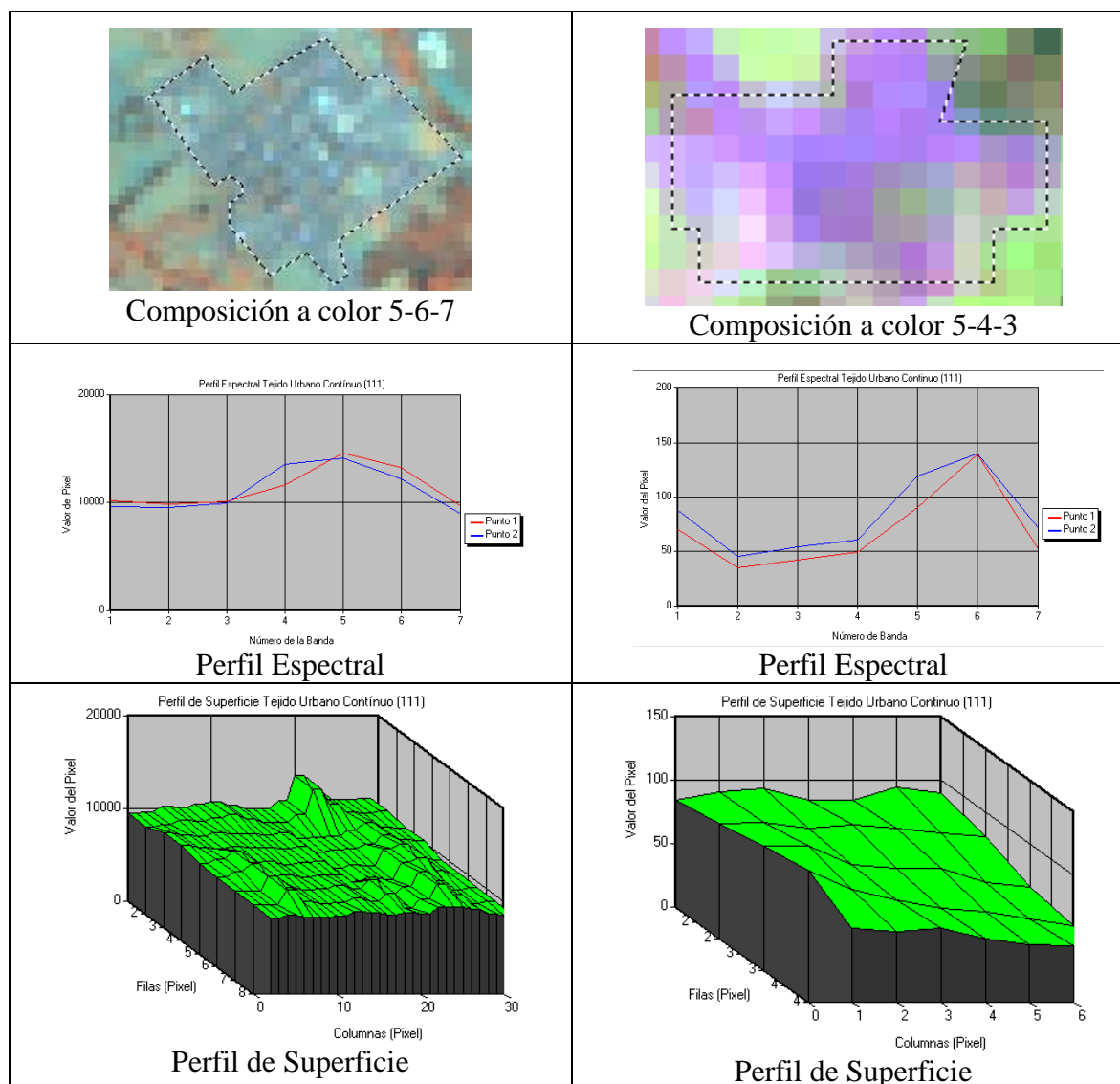
Pictórico-morfológicamente los cultivos confinados tienden a tener formas regulares, comúnmente rectangulares; al contar con cubiertas, se pueden observar líneas paralelas propias de la estructura

del techo del invernadero; son generalmente pequeños y su patrón se asocia al de los cultivos y pastizales, con formas geométricas y se pueden apreciar las estructuras de los techos de las instalaciones. Su textura es media por la presencia de formas cuadriculadas o líneas paralelas sobre los techos; al tener techos plásticos las composiciones a color como las mostradas en la tabla N° 16 tienden a tomar tonalidades de blanco cuando el techo es nuevo, sin embargo, esto nos muestra que estos cultivos ya llevan una gran cantidad de tiempo en funcionamiento, lo demostramos así debido a que en las composiciones a color de Landsat 5 y Landsat 8 encontramos el mismo comportamiento de color en los cultivos confinados.

#### 10.1.4 Tejido Urbano Continúo

Tabla 18. Tejido Urbano Continúo

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1308 656 1339">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1308 1240 1339">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1648 656 1680">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1648 1240 1680">Composición a color 4-2-1</p>





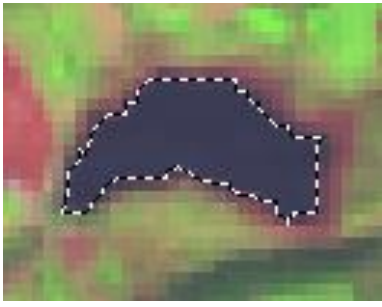

Fuente: ERDAS 2013

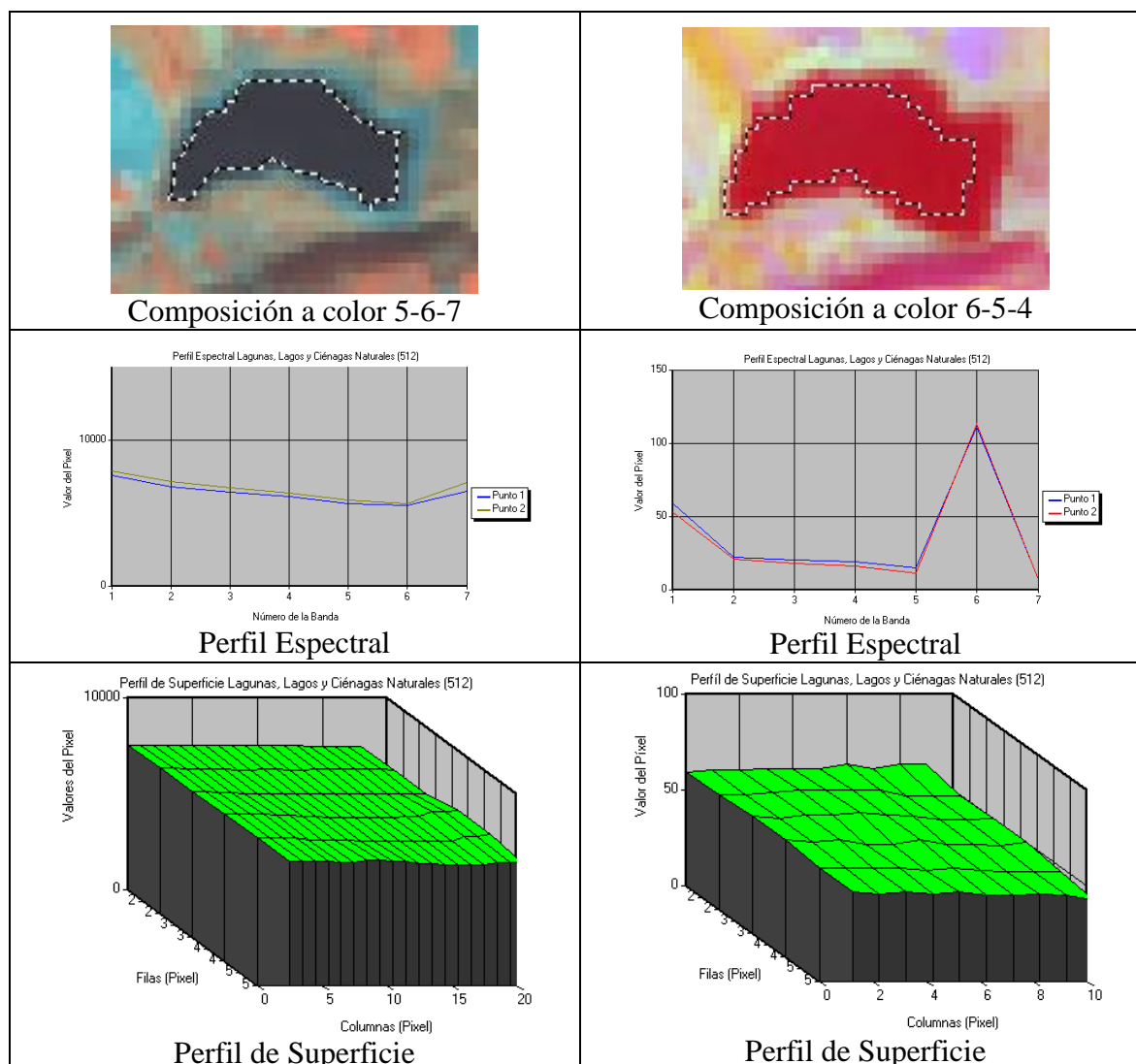
Son aquellos espacios que se conforman por edificaciones, vías y otras superficies que están cubiertas artificialmente; generalmente la porción mínima de tejido urbano es de 5 hectáreas y difícilmente se encuentra una menor, igualmente es muy complicado encontrar coberturas de suelo desnudo o vegetación en este tipo de cobertura. Espectralmente las bandas presentan baja reflectividad, siendo las bandas 5,6 y 7 (las pertenecientes al infrarrojo) las de mayores valores de reflectividad (CIAF, 2005).

Pictórico-morfológicamente las formas asociadas al tejido urbano son muy variadas, pero siempre definidas y asociadas a figuras geométricas; el tamaño es de igual manera variado y depende del desarrollo económico de la zona y de la densidad poblacional principalmente, estos pueden ir desde caseríos hasta enormes distritos. Los patrones son muy bien definidos y se pueden encontrar ejemplos claros como las vías, que forman una especie de cuadrícula dentro de la zona urbana; su textura es media o fina. Para Landsat 8 en una composición a color RGB 5-6-7 presenta tonalidades de azul claro y para Landsat 5 en una composición a color RGB 5-4-3 presenta colores violeta claros

### 10.1.5 Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales

Tabla 19. Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1325 656 1356">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1331 1240 1362">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1688 656 1719">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1688 1240 1719">Composición a color 4-2-1</p>



Fuente: ERDAS 2013


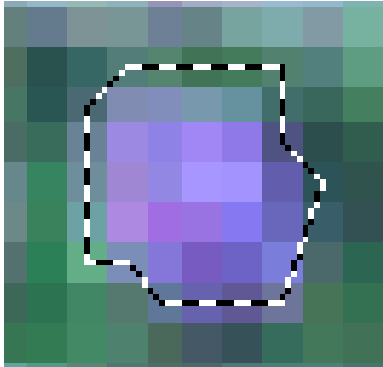
Un río es por definición una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lado o en otro río (IDEAM, 2010). Las superficies de agua absorben la mayor parte de la radiación óptica que reciben, siendo mayor su absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda (Chuvienco, 1995); es por ello que espectralmente las bandas en general presentan una baja reflectividad. En la zona no se presentan grandes espacios geográficos de ríos, se ven más que todo pequeñas lagunas y lagos en lugares dispersos; Estos son superficies de aguas naturales de carácter abierto o cerrado, dulce o salobre, que pueden o no estar

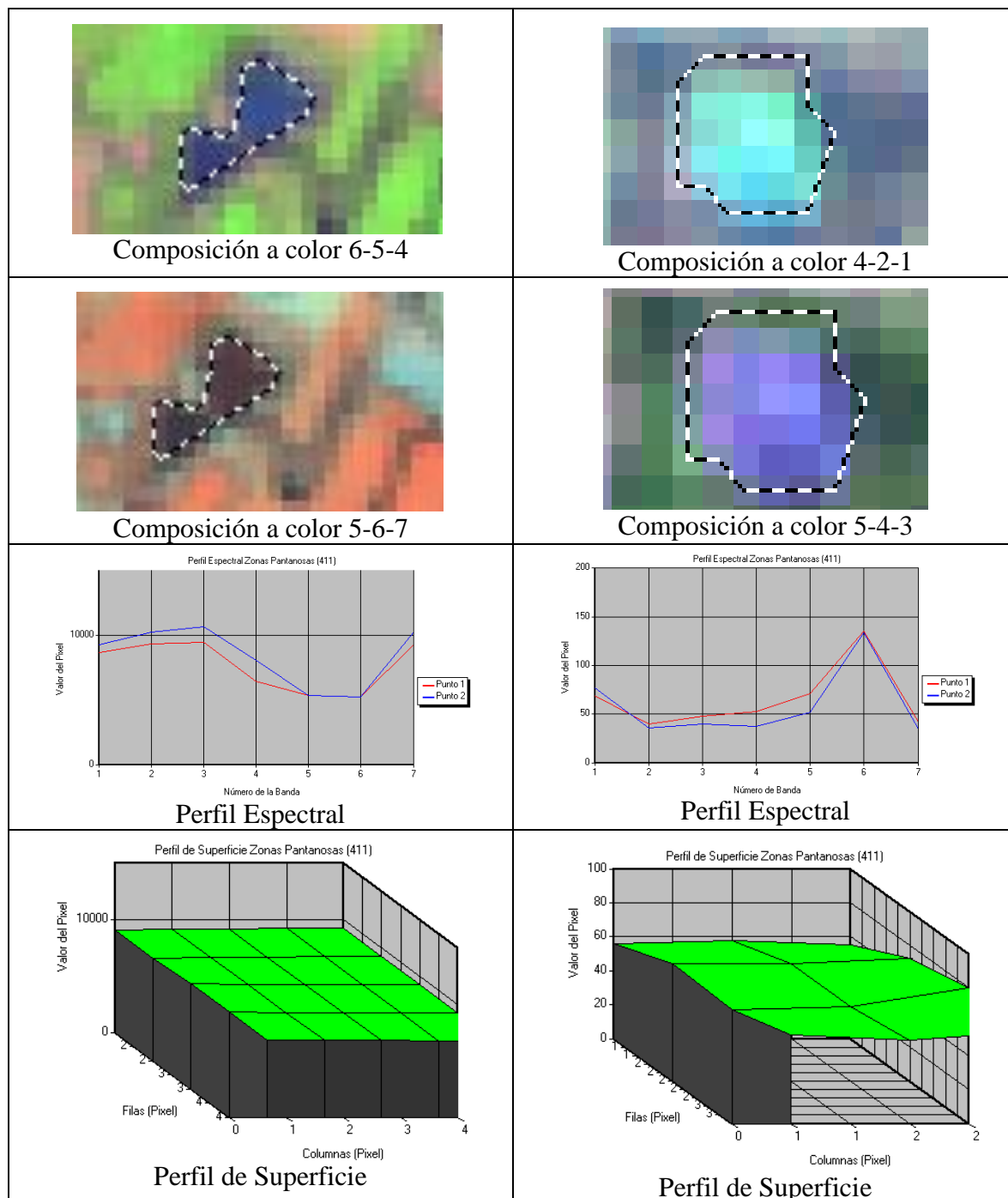
conectadas a un río o con el mar. Por lo general son aguas tranquilas, de modo que su espectro se comporta de modo especular, con valores de reflectividad variados, aunque el tipo de sensor que manejamos hace que los valores sean bajísimos al igual que en los ríos.

Pictórico-morfológicamente su forma varia de irregular a regular dependiendo de factores como la posición geográfica y la intervención del hombre en el cauce del río; el tamaño es también variable y se pueden encontrar ríos cortos con cauces pequeñas o ríos que recorren muchísimo territorio y que tiene un cauce grande; los ríos se asocian a texturas finas o muy finas y por ejemplo para las composiciones de la tabla N°18 pertenecientes a Landsat 8, las tonalidades son oscuras de manera general. Para Landsat 5 en una composición a color 4-2-1 se ven colores con tonalidades que se acercan al cyan lo que podría explicarse por la alta reflectividad del sensor en la banda del infrarrojo.

### 10.1.6 Zonas Pantanosas

Tabla 20. Zonas Pantanosas

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1549 657 1585">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1619 1242 1654">Composición a color 7-4-3</p>



Fuente: ERDAS 2013

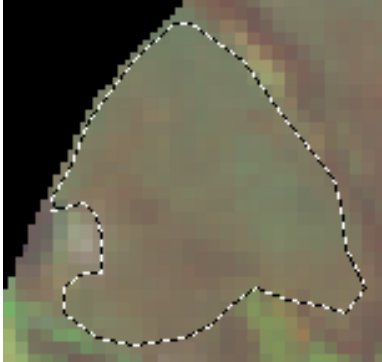

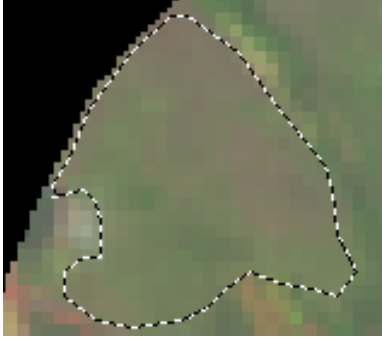

Las zonas pantanosas están asociadas a terrenos bajos, constantemente inundados, donde la capa freática aflora de manera permanente o estacional. De manera general es perfil espectral nos demuestra la gran cantidad de agua que tiene esta cobertura, la baja reflectividad en la mayoría de

las bandas es un indicio de ello; las bandas más activas son las correspondientes al infrarrojo cercano y medio y el perfil de superficie se realizó sobre la banda del infrarrojo cercano y nos evidencia los pocos cambios en su reflectividad.

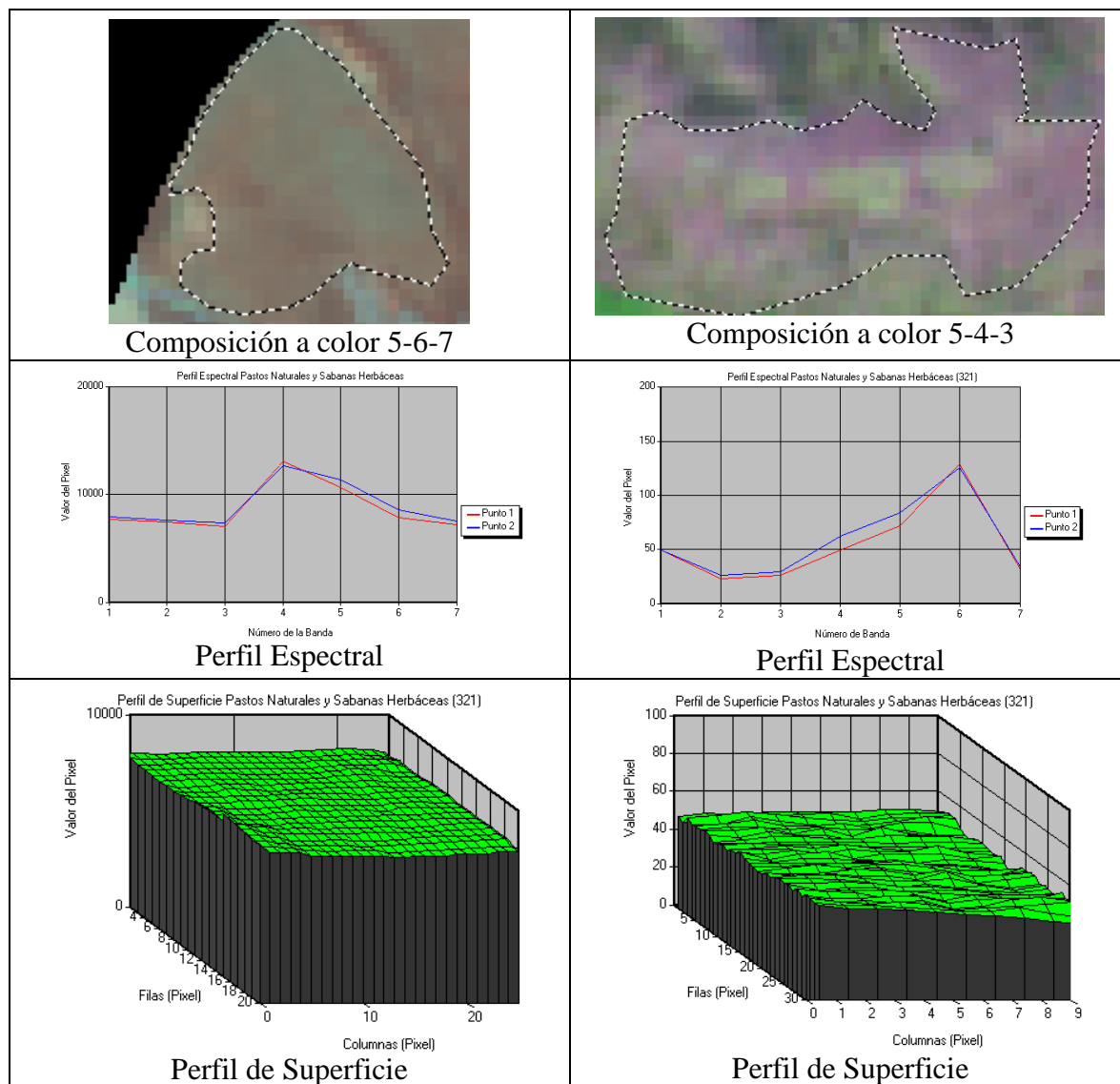
Pictórico-morfológicamente a nivel de forma presenta formas irregulares, y su patrón no es definido; el tamaño es pequeño y su textura es fina y homogénea; para una composición RGB 5-6-4 en Landsat 8 se observan tonalidades azules oscuras pudiéndose confundir con una extensión del cuerpo de agua cercano. Para la composición a color RGB 7-4-3 y 5-4-3 en Landsat 5 se observan tonalidades de variaciones de purpuras o violetas mientras que en la composición RGB 4-2-1 toma tonalidades cercanas al cian,

### 10.1.7 Pastos Naturales y Sabanas Herbáceas

Tabla 21. Pastos Naturales y Sabanas Herbáceas

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1461 656 1493">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1436 1240 1467">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1856 656 1887">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1835 1240 1866">Composición a color 4-2-1</p>





Fuente: ERDAS 2013

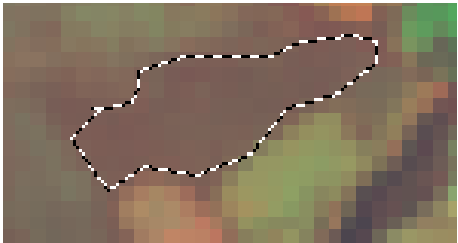
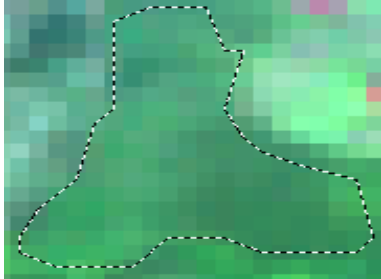


Son una cobertura de vegetación con características de hierba con tallo no maderable y no persistente. Se presenta en cubiertas de maleza de hojas anchas y finas como las gramíneas mayormente predominantes (CIAF, 2005); en esta cobertura suelen encontrarse algunos relictos de zonas húmedas que se deben a la condición de drenaje del suelo, se encuentra en la zona más húmeda de la zona de estudio y debido a estar características es difícil encontrar fauna en esta área pues no posee propiedades en las que pueda brindar alimento a las especies como se observa en el perfil espectral la banda que presenta mayor reflectividad es la del infrarrojo cercano y una

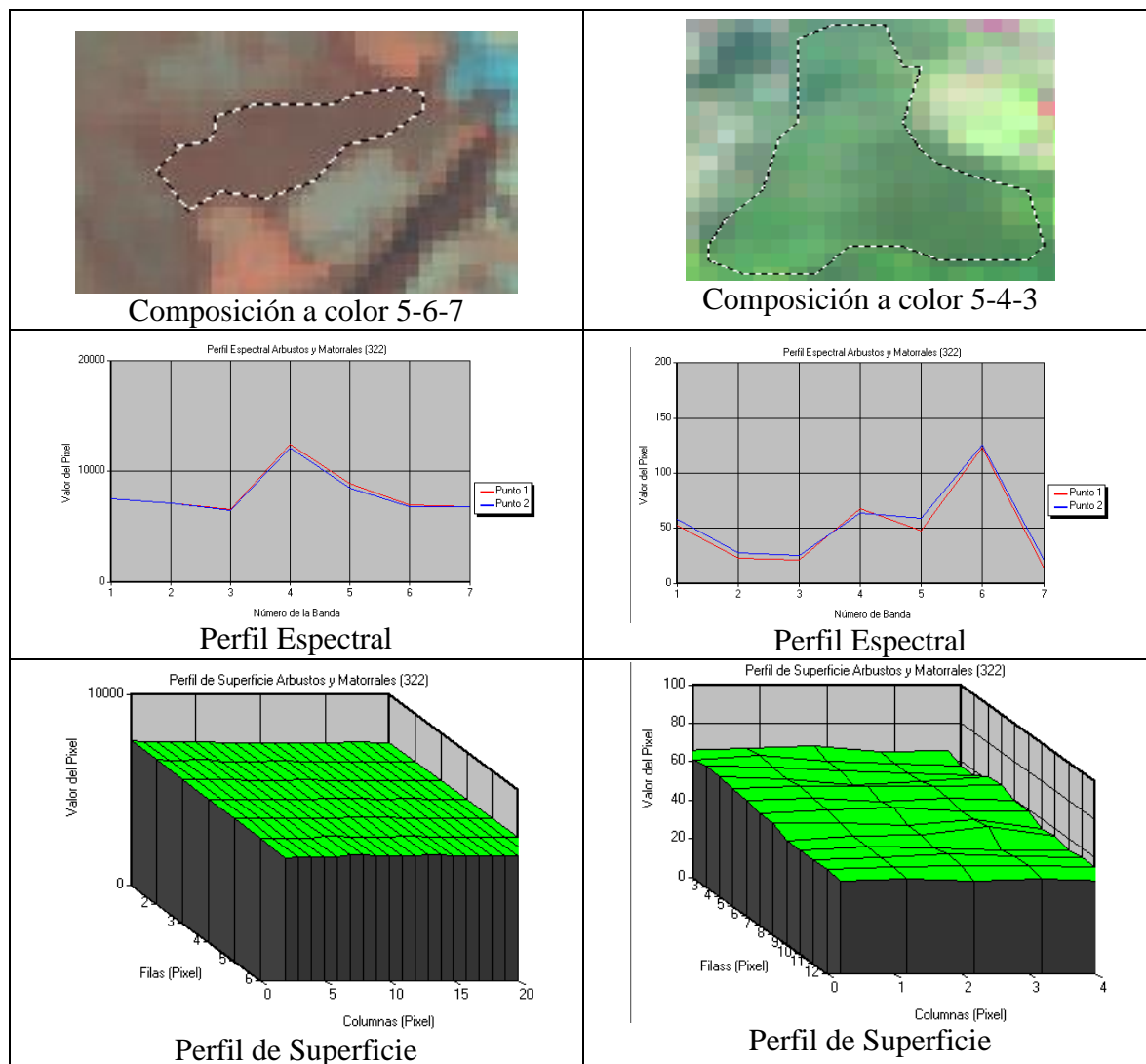
tendencia similar para el infrarrojo medio; las bandas del visible tienen un comportamiento similar de reflectividad baja al igual que la banda del pancromático.

En el análisis pictórico-morfológico encontramos que tiene una forma muy irregular, cuenta con la presencia de bosques de galería que da a los herbazales una forma de manto fino y genera un patrón de drenaje detrítico; por lo general se ve en grandes extensiones, sin embargo, en la zona de estudio no lo es tanto así, pues cubre una parte de la montaña al occidente, pero no en una gran cantidad. Suele ser de textura muy fina y homogénea cuando se ve la cobertura propiamente, al tener presencia de bosque puede variar a texturas medias; podemos ver que para Landsat 8 la tonalidad y el color no varía significativamente con la composición a color y tiende a tomar tonalidades del verde oliva, en Landsat 5 en una composición a color RGB 4-2-1 por ejemplo, podemos ver como esta cobertura toma colores azules claros con salpicaduras en tonos tierra.

### 10.1.8 Arbustos y Matorrales

Tabla 22. Arbustos y Matorrales

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1486 657 1522">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1522 1242 1558">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1843 657 1879">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1822 1242 1858">Composición a color 4-2-1</p>






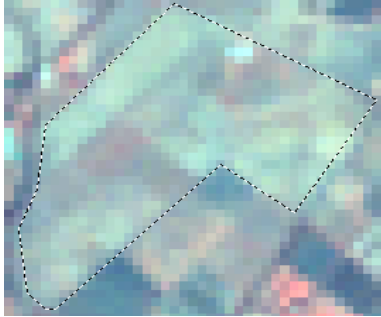
Fuente: ERDAS 2013

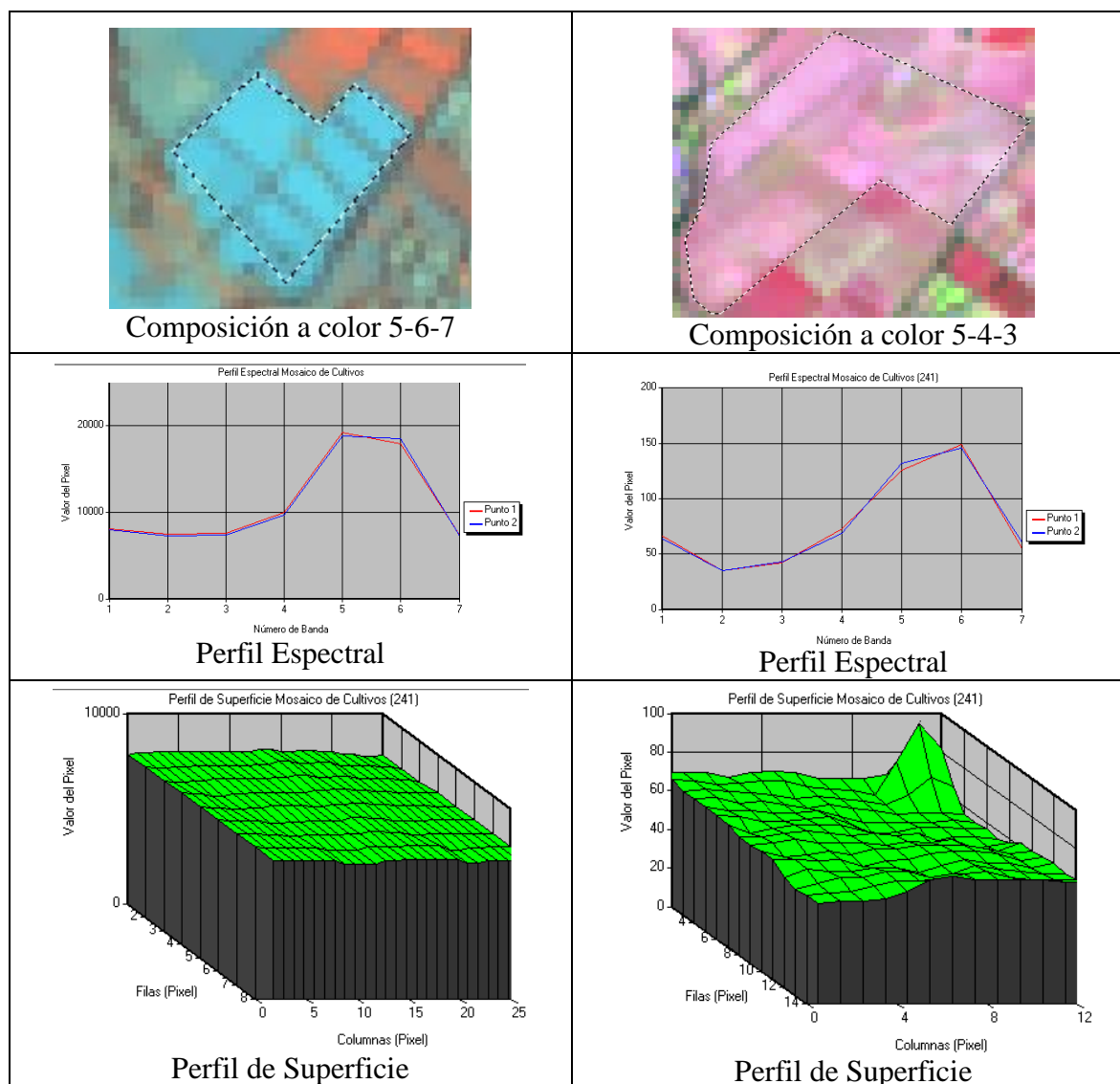
Corresponde a una cobertura en la que no se ve la intervención de efectos antrópicos ni fenómenos naturales. Se considera de una alta importancia ambiental pues cuentan con propiedades de condensación del vapor de agua y de protección del suelo contra la erosión, adicional a ser hábitat de algunas especies de aves silvestres; adicional es una cobertura que se ve fuertemente amenazada por la tala e incendios. Espectralmente muestra el comportamiento normal de otras coberturas vegetales, con bajos niveles en el espectro visible y un aumento significativo en la banda del Infrarrojo cercano.

El análisis pictórico-morfológico nos deja ver formas irregulares sin un patrón definido, esto puede deberse a que, al encontrarse en zonas de difícil acceso para el hombre, este no interviene en esta cobertura de gran manera; suele ser de tamaños variables entre pequeñas y medianas extensiones. Su textura es fina y generalmente homogénea y con rugosidad muy baja; en cuestiones de tono y color podemos observar para la composición a color RGB 5-6-7 de Landsat 8 unos tonos marrones oscuros que corresponden a los matorrales; en Landsat 5 vemos en composición RGB 5-4-3 tonalidades verdes claras, mientras que en composición RGB 4-2-1 nos encontramos con colores que varían entre los púrpuras y los rosados.

### 10.1.9 Mosaico de Cultivos

Tabla 23. Mosaico de Cultivos

<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 5</b>
 <p data-bbox="310 1308 656 1339">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="894 1291 1240 1323">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1686 656 1717">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="894 1671 1240 1703">Composición a color 4-2-1</p>



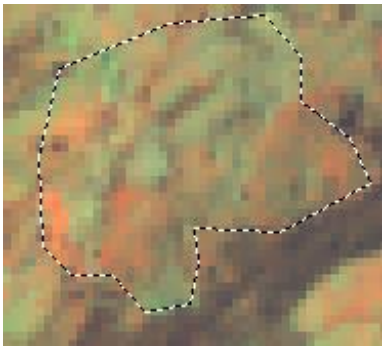
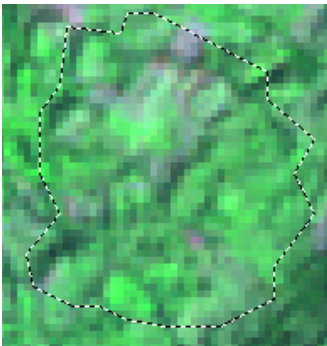
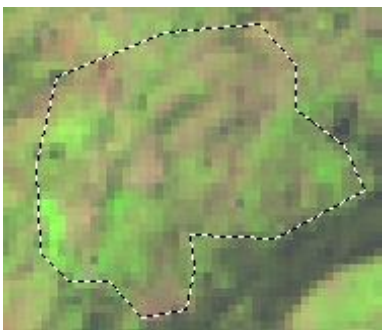
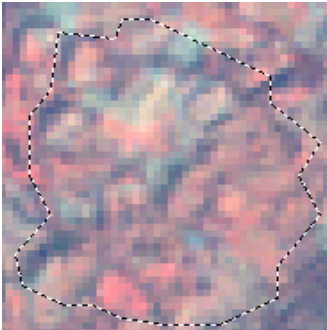
Fuente: ERDAS 2013

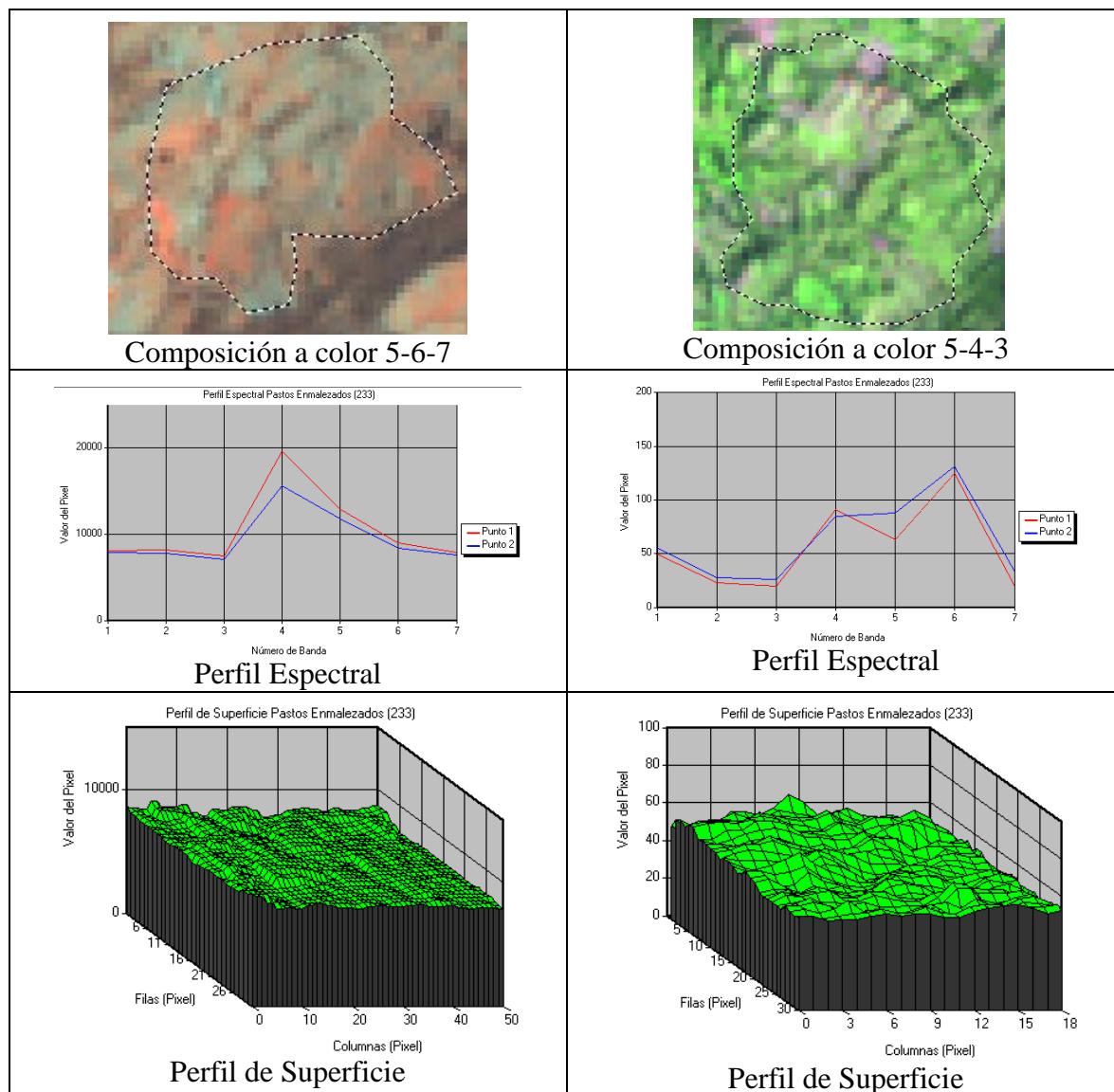
Son agrupaciones de elementos inherentes a las actividades del hombre en el campo relacionadas con la búsqueda de alimento; los cultivos pueden ser permanentes (Su ciclo vegetativo dura más de dos años y ofrecen durante estas varias cosechas), semipermanentes (Su ciclo vegetativo dura entre uno y dos años) y temporales (Su ciclo vegetativo dura un año o menos) (CIAF, 2005), estos últimos son los de mayor presencia dentro de la zona de estudio con una importante extensión de hectáreas, se pueden ver cultivos de papa, maíz y arroz entre otros transitorios.

Pictórico-morfológicamente presenta formas regulares y geométricas en las que se alcanza a distinguir los límites de los lotes de siembra, con patrones definidos y con presencia de canales de riego y vías de comunicación; con tamaños generalmente pequeños o medianos. Se observan texturas finas y homogéneas y en composiciones a color RGB 6-5-4 de Landsat 8 sus tonalidades son de color rosado, en Landsat 5 apreciamos que en una combinación a color 5-4-3 los colores que presenta la cobertura son igualmente rosados.

### 10.1.10 Pastos Enmalezados

Tabla 24. Pastos Enmalezados

Landsat 8	Landsat 5
 <p data-bbox="310 1203 656 1234">Composición a color 5-6-4</p>	 <p data-bbox="898 1203 1243 1234">Composición a color 7-4-3</p>
 <p data-bbox="310 1575 656 1606">Composición a color 6-5-4</p>	 <p data-bbox="898 1575 1243 1606">Composición a color 4-2-1</p>



Fuente: ERDAS 2013

Esta cobertura incluye pastos con especies arvenses que se consideran por los productores como malezas que opacan el cultivo principal, se presentan por el poco manejo por parte de los agricultores y alcanzan alturas por debajo de 1,5 metros. Sin embargo, con el correcto manejo de esta cobertura es posible convertirla en pastos limpios para realizar actividades de agricultura o ganadería. Espectralmente se ve una tendencia de valores bajos en el espectro visible y en la banda

del pancromático; las bandas del infrarrojo tienen valores un tanto más altos, sobre todo en la banda del infrarrojo cercano.

Su forma es bastante irregular, el tamaño es variable (pequeño, mediano, grande) y sin patrón definido. De textura fina pero heterogénea pues se ve acompañada de pastizales y cultivos. Sus tonalidades son bastantes variables dependiendo de la composición, por ejemplo, en Landsat 8 vemos para una composición RGB 5-6-4 observamos tonalidades naranjas, que según la época del año puede variar entre naranjas claros u oscuros; en Landsat 5 en composiciones a color RGB 7-4-3 y 5-4-3 encontramos que esta cobertura nos deja ver colores verdes variados dependiendo de la intervención de la banda 7 y 5 que son las que varían en estas composiciones de color, para el primer caso los verdes son más oscuros pues la banda 7 es menos reflectiva que la banda 5 que es el segundo caso.

## **11. Modelación del cambio de cobertura del suelo**

### **11.1 Elaboración matriz de transición con IDRISI Selva**

IDRISI es un software especializado en Sistemas de Información Geográfica de los laboratorios Clark, han trabajado en su configuración por casi tres décadas y a la fecha, cuentan con al menos 300 herramientas de análisis espacial básico y complejo y otras herramientas tradicionales y de modelado para satisfacer las necesidades de los profesionales del área de la geomática.

Encontramos herramientas de análisis estadístico espacial que están destinadas a la descripción de las características espaciales de un conjunto de datos, estas herramientas incluyen medidas de punto de distribución, regresión de la imagen simple y múltiple, regresión logística multinomial,



logístico y procedimientos de auto correlación, medidas patrón y la textura, el análisis de superficie de tendencia polinómica y muestreo espacial y procedimientos aleatorios de generación para el apoyo de la simulación Monte Carlo.

Adicional cuenta con herramientas para el cambio y análisis de series temporales que son hoy en día muy útiles para identificar y cuantificar los cambios a través de múltiples imágenes con el fin de estudiar los fenómenos que producen estas variaciones, estas características de análisis encierran procesos como: diferencias en la imagen, ratioing (medidas por medio de radios), diferenciación de regresión, el análisis del cambio del vector, y el análisis de datos cualitativos. En este mismo conjunto vemos que el software además puede realizar mediante procesos de simulación, modelado predictivo cobertura de la tierra que incluye el análisis de la cadena de Markov, autómatas celulares, la regresión logística y regresión logística multinomial, GEOMOD y redes neuronales artificiales.

### ***Cadenas de Markov y Autómatas Celulares en IDRISI***

Como sabemos un proceso de Markov es aquel en el que el estado de un sistema en un tiempo  $t_1$  puede ser predicho por el estado de un sistema en un tiempo  $t_0$ , esto mediante una matriz de probabilidades que el módulo MARKOV del software utiliza para crear una matriz de transición de cada clase de cobertura a las demás clases existentes; así pues, el modulo exige como entrada dos mapas de coberturas de la misma zona y con tiempos diferentes tal como se muestra en la figura N° 12

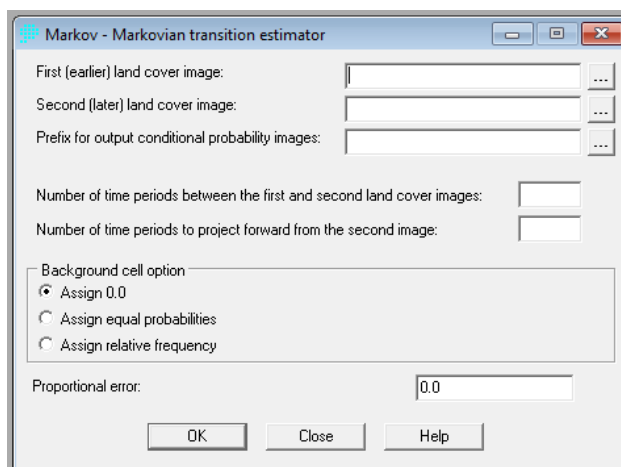


Figura 12. Módulo de Cadenas de Markov

Este genera como salida tres archivos: Una matriz de Probabilidades de Transición, Una Matriz de áreas de Transición y Un Conjunto de Imágenes de Probabilidad Condicional

*Matriz de Probabilidades de Transición:* Esta matriz muestra la posibilidad de que un pixel de la clase dada, cambie a cualquier otra clase o que permanezca igual en el próximo periodo de tiempo.

*Matriz de Áreas de Transición:* Esta expresa la superficie total (en las células) que se cambien en el próximo período de tiempo.

*Imágenes de Probabilidad Condicional:* Se genera una imagen para cada cobertura o clase, y expresan la probabilidad de que cada pixel pertenecerá a la clase designada, en el próximo periodo de tiempo. Se llaman de probabilidad condicional pues está condicionada a su estado actual.

Ahora bien, debemos entender que un elemento clave en el cambio de coberturas es la *Proximidad*, así, una clase tendrá mayor probabilidad de cambiar a una que se encuentre en cercanías (reducción), o por el contrario las clases que estén alrededor de una clase predominante tienen más probabilidad de cambiar a esta clase (expansión). Estos fenómenos pueden modelarse fácilmente con el uso de *Autómatas Celulares*, Un autómatas celular es una entidad celular que varía de forma

independiente su estado con base en su estado anterior y el de sus vecinos más próximos. Es muy parecido al uso de Markov, sin embargo, la diferencia radica en que los autómatas celulares tienen como un criterio de decisión adicional los estados de los pixeles vecinos para el caso de imágenes.

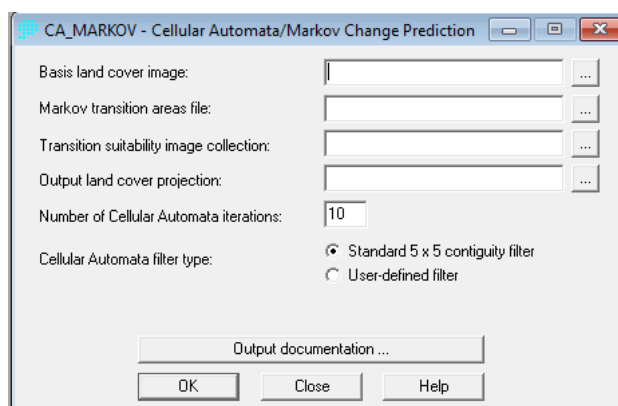


Figura 13. Módulo de Markov con Autómatas Celulares

En IDRISI, el Modulo de CA\_MARKOV que es el utilizado para realizar Cadenas de Markov con Autómatas Celulares pide como entrada de datos el nombre del mapa de coberturas de la tierra para el cual deben ser proyectados los cambios, el archivo de áreas de transición producido por MARKOV en el proceso anterior y una colección de imágenes, también producidas por el ejercicio anterior, que expresan la idoneidad de un pixel para cada una de las coberturas que se tienen en consideración (figura N° 13). A partir de estos se produce un proceso iterativo bajo el cual se asigna una cobertura hasta que se encuentran las áreas totales previstas anteriormente con el módulo de MARKOV siguiendo la lógica siguiente:

El número de iteraciones que pide el modulo (Figura y), corresponde al total de pasos en el tiempo establecidos por el intérprete, es decir el número de años hacía el futuro para el cual desea hacer la predicción.

Dentro de cada iteración, cada clase perderá parte de su espacio a una o más de las otras clases (y También puede ganar espacio de otras clases). Así, dentro de cada iteración, la clase demandante, selecciona tierras de la clase “anfitriona” basada en el mapa de convivencia para la clase demandante. Como es de esperarse habrá una competencia por la carga de tierra de la clase específica, es cuando entra el modulo MOLA del software que hace las asignaciones a la clase que mejor se acomode al espacio.

El componente de autómata celular surge en este proceso iterativo de asignación de tierra. Por defecto el modulo usa un rendimiento de filtro de 5x5 para alcanzar una coacción de contigüidad entre los pixeles. Por filtración de una máscara Booleana de la clase que está siendo considerada, el rendimiento de filtro cede un valor de 1 cuando se encuentra completamente dentro de la clase objeto y un valor de 0 cuando está completamente fuera. Este resultado es multiplicado por la imagen para esa clase que se produjo en el módulo de MARKOV.

El resultado final es que los cambios de cobertura se desarrollan como un proceso de crecimiento en las áreas de alta convivencia próxima a áreas ya existentes.

## **11.2 Elaboración matriz de transición según L. Urban y O. Wallin**

El insumo principal es la clasificación supervisada de las imágenes del año 2001 y 2015, el comportamiento de cada cobertura en el tiempo fue estudiado mediante algebra de mapas, finalmente la matriz de transición se conformó por la probabilidad que tiene cada cobertura en el año 2001 de cambiar al 2015.

- Cambio de variables a números: Este proceso es necesario para ver el cambio sufrido por cada cobertura mediante algebra de mapas. Se creó una matriz donde las coberturas del año 2001 corresponden a las filas y las coberturas del año 2015 corresponden a las columnas,

cada cobertura se renombra con un número entero (1 – 10 y 100 - 1000), finalmente la matriz se compone de la suma de los números que se asignaron a cada cobertura.

Figura 14. Matriz de asignación de cambio.

		<i>Herbazales</i>	<i>Bosques</i>	<i>Arbustos y matorrales</i>	<i>Pastos enmalezados</i>	<i>Cultivos</i>	<i>Zonas pantanosas</i>	<i>Cultivos confinados</i>	<i>Pastos limpios</i>	<i>Urbano</i>	<i>Lagos</i>
		<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<i>Herbazales</i>	<b>1</b>	101	201	301	401	501	601	701	801	901	1001
<i>Bosques</i>	<b>2</b>	102	202	302	402	502	602	702	802	902	1002
<i>Arbustos y matorrales</i>	<b>3</b>	103	203	303	403	503	603	703	803	903	1003
<i>Pastos enmalezados</i>	<b>4</b>	104	204	304	404	504	604	704	804	904	1004
<i>Cultivos</i>	<b>5</b>	105	205	305	405	505	605	705	805	905	1005
<i>Zonas pantanosas</i>	<b>6</b>	106	206	306	406	506	606	706	806	906	1006
<i>Cultivos confinados</i>	<b>7</b>	107	207	307	407	507	607	707	807	907	1007
<i>Pastos limpios</i>	<b>8</b>	108	208	308	408	508	608	708	808	908	1008
<i>Urbano</i>	<b>9</b>	109	209	309	409	509	609	709	809	909	1009
<i>Lagos</i>	<b>10</b>	110	210	310	410	510	610	710	810	910	1010

Fuente: Excel 2013

- Algebra de mapas: Este proceso se realizó en ArcGis mediante la herramienta Raster Calculator de Map Algebra, al realizar la suma de las coberturas renombradas se obtuvo un shapefile con los resultados de la matriz N°14. Se generó una tabla de atributos con el comportamiento sufrido por cada cobertura y el área correspondiente que cambio o que permaneció igual, esto último fue el insumo principal para la construcción de la matriz de conteo.
- Probabilidad de cambio: Esta metodología se realizó según L. Urban y O. Wallin (2002), donde el centro fue la construcción de la matriz de transición, para el modelado del cambio del paisaje en el Noroeste del Pacífico en EEUU. Se dividió cada elemento de la matriz de

conteo por el total de su renglon para obtener la matriz de probabilidades para un periodo de 14 años (2001-2015).

$$P_{ij} = \frac{\text{Area Cobertura}_{ij}}{\text{Total area cobertura}_j}$$

Ecuación 13. Probabilidad de cambio

Donde “*i*” es un tipo de cobertura que ha cambiado a otra “*j*”;  $P_{ij}$  es la probabilidad de cambio de una cobertura en un estado de tiempo.

- Matriz de transición anual: Esto se realizó para ver el cambio anual de cada cobertura y facilitar la proyección al año 2025. Para el proceso se dividió cada elemento de la matriz de transición que se encontraba fuera de la diagonal principal entre 14; los elementos de la diagonal principal se ajustaron para que la sumatoria de cada renglón fuera igual a 1.
- Predicción: La matriz de transición anual es el corazón de la cadena de Markov, para la predicción del cambio de cobertura al año 2025, se elevó dicha matriz a la 10 y se multiplico por el estado actual de las coberturas del suelo.

## 12. Resultados y discusión

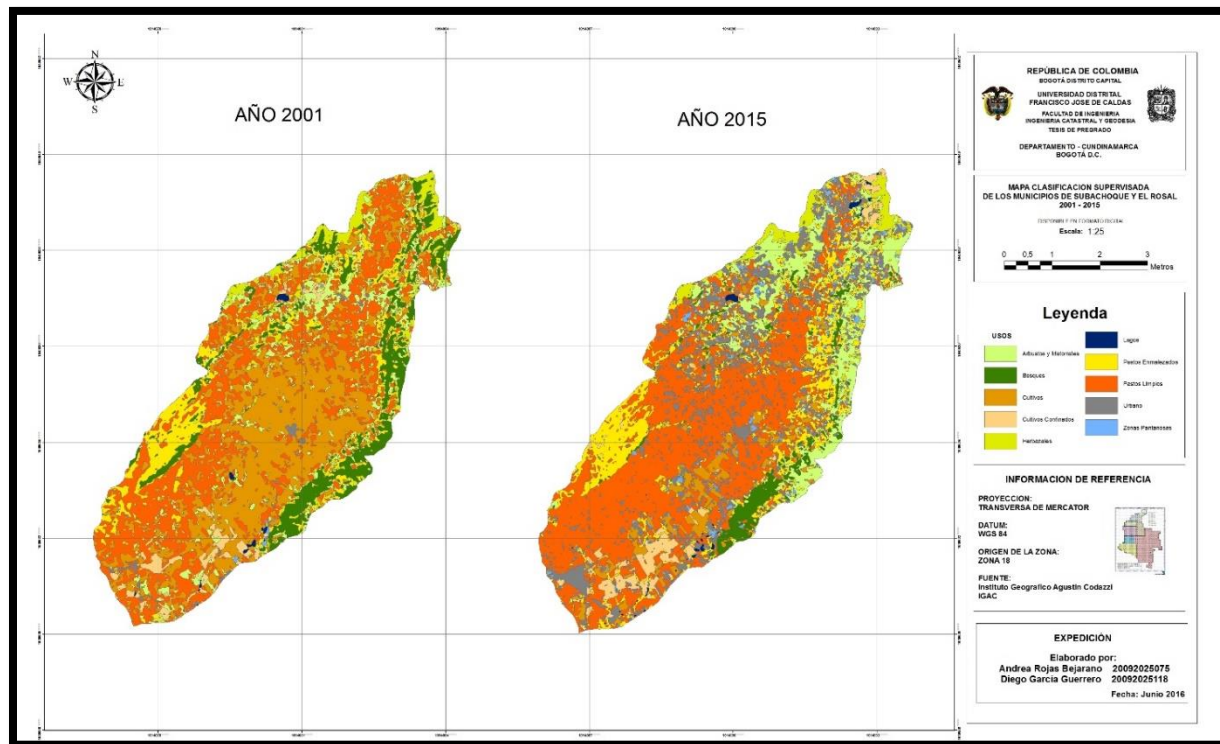


Figura 15. Clasificación Supervisada Municipio El Rosal y Subachoque

Realizar la clasificación de todos los cambios de cobertura en una zona resulta ser un proceso muy extenso, que requiere de recursos y además resulta ser poco práctico para la escala a la cual se está trabajando, por lo que se realizó la clasificación y el análisis de las transiciones más importantes, el resultado se observa en la gráfica N° 15, entre los cambios más significativos se encuentra el aumento de zonas urbanas, al igual que el incremento en poco más del doble de pastos enmalezados y la significativa disminución de las zonas dedicadas a cultivos y bosques. En el tiempo de estudio no se formaron nuevas coberturas, solo se modificaron las que habían.

## 12.1 Coberturas año 2001 y 2015

Tabla 25. Área por coberturas año 2001.

Área Coberturas año 2001 (Km)									
Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
18,067325	29,419909	26,577165	25,664243	91,677147	0,438381	8,547209	96,619196	2,201246	0,84851

Fuente ArcGis 10.2.

En los dos municipios a inicios de una nueva década se apreciaba un enfoque económico comandado por los usos agrícolas, donde un 31% del área total se destinaba a la explotación del suelo por medio de cultivos, las zonas de pastos limpios que correspondían a un 32% de la zona de estudio, pertenecían en su mayoría a zonas usadas para ganadería, franjas sujetas a inundaciones, pequeñas zonas de cultivos y pastos manejados como cercas vivas, otra importante y creciente actividad económica pertenecía a los cultivos confinados con un 3%. Las zonas de vegetación como los bosques contaban con un importante área del 10%, los arbustos y matorrales 9%, zonas pantanosas 0,15%, pastos enmalezados 9%, lagos 0,28% y herbazales 6%, la zona urbana era una de las más pequeñas con tan solo un 1% del área total.

Tabla 26. Área por coberturas año 2015.

Área Coberturas año 2015 (Km)									
Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
10,408573	12,207729	35,642925	50,340778	20,6879	7,620278	10,700568	131,373194	41,773481	1,232332

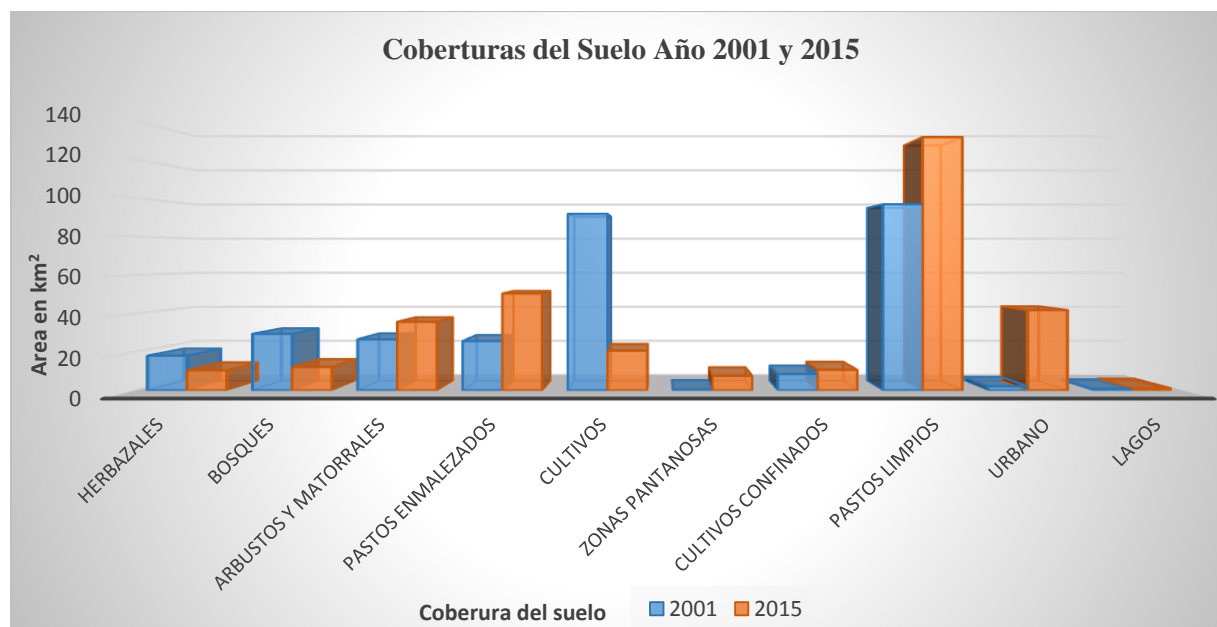
Fuente: ArcGis 10.2

En el año 2015 la cobertura con mayor extensión pertenece a los pastos limpios, con un aumento de aproximadamente 35 km<sup>2</sup>, las crecientes pretensiones económicas en donde predominan el pasto Kikuyo y ray grass utilizado para ganadería y el turismo, han sido impulsadas por la vecindad



con Bogotá, un mercado importante de alimentos (leche, carne) y de familias que buscan la tranquilidad del campo sin tener que realizar grandes recorridos. Los comportamientos de cada cobertura se observa de manera más clara en la siguiente gráfica:

Figura 16. Coberturas del suelo años 2001 y 2015.



Fuente: Excel.

Grandes cambios se presentaron en los catorce años transcurridos, la cobertura vegetal de bosques y herbazales disminuyeron en un 59% y 42% respectivamente, por el contrario los arbustos y matorrales como consecuencia de la actividad humana aumentaron un 34%, este aumento se dio en la parte nororiental de los municipios donde en su mayoría había cobertura de bosques. La cobertura de pastos enmalezados aumento un 96% es decir que 50 km<sup>2</sup> de los municipios no tienen mayor intervención, por su parte los pastos limpios, es decir los pastos intervenidos para alguna actividad humana se incrementó un 36% con cerca de 35 km<sup>2</sup> nuevos para realizar dichas actividades. Las áreas dedicadas a la explotación económica como los cultivos disminuyeron considerablemente con un 77%, esto por un lado a que las propiedades se han venido fragmentando

creando minifundios donde la explotación agrícola se dificulta, se suman los altos costos de producción y la falta de canales de comercialización según la Alcaldía de El Rosal (2016), se ha generado una migración a nuevas actividades económicas más rentables para la población, por otro lado el uso y cobertura de cultivos confinados en especial en la parte sur del municipio de El Rosal tuvo un crecimiento del 25%, esta actividad se ha venido consolidando en el municipio por la fuerte acogida de las flores a nivel nacional e internacional. Los cuerpos de agua han tenido un comportamiento particular, los lagos aumentaron 0.4 km<sup>2</sup> para un total final de 1,23 km<sup>2</sup> en el 2015, las zonas pantanosas aumentaron hasta llegar a un total de 7 km<sup>2</sup>, finalmente los cascos urbanos atravesaron un crecimiento acelerado, llegando al 2015 a un total de aproximadamente 42 km<sup>2</sup>, es decir un crecimiento urbano muy alto de cerca de 3 km<sup>2</sup> anuales, claramente es una cifra muy por debajo de grandes ciudades que se expanden en promedio 9 km<sup>2</sup> cada año.

## 12.2 Matriz de transición de IDIRISI

Tabla 27. Matriz de Transición de IDIRISI.

	Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
Herbazales	0,4698	0,0358	0,142	0,1319	0,0192	0,0245	0,0384	0,023	0,1094	0,006
Bosques	0,0413	0,3993	0,4595	0,0814	0	0	0,0162	0	0	0,0022
Arbustos y Matorrales	0,0366	0,0418	0,3449	0,1917	0,0304	0,0358	0,0517	0,1574	0,1096	0
Pastos Enmalezados	0,0054	0,0177	0,1824	0,5251	0,0041	0,0088	0,007	0,214	0,0354	0
Cultivos	0,0027	0,0005	0,0151	0,0529	0,1487	0,0291	0,0235	0,5775	0,15	0
Zonas Pantanosas	0	0,0131	0,1696	0,1338	0	0	0	0,1232	0,3902	0,1702
Cultivos Confinados	0,0025	0,0032	0,0784	0,0935	0,0872	0,0334	0,3868	0,1451	0,1685	0,0015
Pastos Limpios	0	0	0,0285	0,0983	0,0477	0,0253	0,0195	0,6637	0,1158	0
Urbano	0	0	0	0,0031	0,0088	0,006	0,0256	0,2125	0,7431	0
Lagos	0	0	0	0,0463	0	0,2143	0,0111	0,0144	0,061	0,6528

Fuente: IDIRISI.

La matriz anterior es el resultado de un proceso estocástico para un periodo de 10 años, se evidencia alta dinámica de cambio del uso y coberturas del suelo, la diagonal principal revela la

probabilidad de que cada cobertura del suelo permanezca igual en el año 2025, los cascos urbanos como se esperaba por el modelo de crecimiento urbano Colombiano y de la gran mayoría de países del mundo, concentra la mayor probabilidad de permanecer igual, otras coberturas como los pastos limpios, los lagos y los pastos enmalezados también tienen alta probabilidad de permanecer invariantes, caso contrario pasa con las demás coberturas, en el caso de las zonas pantanosas no tienen probabilidad de permanecer igual, pero sí otras coberturas cederán parte de su área a nuevas zonas pantanosas, este comportamiento se da en primera instancia por la dificultad existente de estudiar pequeñas áreas con imágenes de resolución media, en segundo lugar estas áreas contienen aguas estancadas poco profundas y pueden aparecer o desaparecer dependiendo del clima.

### 12.3 Matriz de Transición según L. Urban y O. Wallin

Tabla 28. Matriz de transición según L. Urban y O. Wallin

	Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
Herbazales	0,6665	0,0180	0,0670	0,0783	0,0100	0,0087	0,0255	0,0348	0,0848	0,0066
Bosques	0,0187	0,6277	0,2254	0,0697	0,0032	0,0029	0,0190	0,0174	0,0144	0,0018
Arbustos y Matorrales	0,0144	0,0169	0,6407	0,1160	0,0134	0,0151	0,0353	0,0840	0,0621	0,0020
Pastos Enmalezados	0,0016	0,0091	0,0994	0,7476	0,0078	0,0048	0,0053	0,0919	0,0320	0
Cultivos	0	0	0,0181	0,0532	0,5391	0,0102	0,0139	0,2810	0,0810	0,0018
Zonas Pantanosas	0	0,0011	0,0899	0,0078	0,0016	0,4907	0,0051	0,0211	0,2202	0,1615
Cultivos Confinados	0	0	0,0399	0,0468	0,0397	0,0128	0,6347	0,1036	0,1197	0,0017
Pastos Limpios	0	0,0010	0,0215	0,0705	0,0281	0,0106	0,0123	0,7750	0,0778	0,0025
Urbano	0	0	0,0018	0,0055	0,0063	0	0,0133	0,1254	0,8466	0
Lagos	0	0	0,0089	0	0	0,1202	0,0109	0,0042	0,0557	0,7988

Fuente: Excel 2010

Si se comparan los resultados de la diagonal principal con los de la matriz obtenida en IDIRISI se observa que las probabilidades de que las coberturas no varíen en el tiempo son mayores, en el caso de las zonas pantanosas conservan la tendencia a desaparecer, pero no del todo como en la matriz obtenida con el software. Otro resultado interesante es la probabilidad de que el suelo

urbano cambie a otras coberturas, este fenómeno se presenta en las matrices elaboradas por los dos métodos, la incongruencia se da por el tipo de insumos utilizados, básicamente a mayor nivel de detalle o resolución espacial de las imágenes, mejores serán los resultados y predicciones.

De continuar la actual dinámica del uso del suelo algunas coberturas tienen una tendencia a desaparecer como es el caso de los bosques y los cultivos, las coberturas tienen mayor probabilidad de cambiar a usos y coberturas como el suelo urbano, arbustos, matorrales y pastos.

#### 12.4 Prueba Chi – Cuadrado de Homogeneidad

La prueba de homogeneidad se realizó para comparar los resultados de las matrices de transición obtenidas con los dos métodos usados, la aceptación de la hipótesis nula añade veracidad a las predicciones realizadas para el año 2025.

$H_0 =$  Los resultados obtenidos son de poblaciones homogéneas

$H_1 =$  Los resultados obtenidos no son de poblaciones homogéneas

$$\text{Se acepta } H_0 \text{ si: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} < X^2_{\alpha, (K-1)*(m-1)}$$

Ecuación 14. Aceptación hipótesis nula

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \geq X^2_{\alpha, (K-1)*(m-1)}$$

Ecuación 15. Rechazo Hipótesis nula

Tabla 29. Tabla cálculo de  $X^2$ .

	Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
Herbazales	0,0581	0,0177	0,0841	0,0366	0,0086	0,0289	0,0065	0,0040	0,0071	0,0000
Bosques	0,0275	0,0831	0,2431	0,0020	0,0032	0,0029	0,0004	0,0174	0,0144	0,0001
Arbustos y Matorrales	0,0344	0,0364	0,1366	0,0494	0,0217	0,0283	0,0077	0,0641	0,0362	0,0018

<b>Pastos Enmalezados</b>	0,0092	0,0082	0,0694	0,0662	0,0017	0,0033	0,0006	0,1622	0,0004	0,0006
<b>Cultivos</b>	0,0051	0,0002	0,0005	0,0000	0,2827	0,0349	0,0066	0,3128	0,0588	0,0018
<b>Zonas Pantanosas</b>	0,0009	0,1287	0,0705	2,0285	0,0016	0,4907	0,0051	0,4952	0,1312	0,0005
<b>Cultivos Confinados</b>	0,0099	0,0090	0,0372	0,0467	0,0568	0,0331	0,0968	0,0166	0,0199	0,0000
<b>Pastos Limpios</b>	0,0002	0,0010	0,0022	0,0109	0,0137	0,0205	0,0042	0,0160	0,0185	0,0019
<b>Urbano</b>	0,0000	0,0001	0,0018	0,0010	0,0010	0,0278	0,0114	0,0606	0,0127	0,0037
<b>Lagos</b>	0,0000	0,0001	0,0089	2,7024	0,0005	0,0738	0,0000	0,0253	0,0005	0,0267

Fuente: Excel 2010

$$X^2 = 8,8137$$

$$X^2_{0,95}(81) = 113,1452$$

Como:  $X^2 = 8,8137 < 113,1452 = X^2_{0,95}(81)$  se acepta la hipótesis nula de homogeneidad en los dos resultados. Las probabilidades de cambio de cada cobertura obtenidas por medio de los dos métodos usados son homogéneas, es decir para la predicción realizada a 10 años fue suficiente la información respecto a la dinámica de los usos y coberturas del suelo, información adicional como políticas gubernamentales, crecimiento poblacional, dinámica económica y cambio climático entre otras, aumentan la exactitud en la predicción, pero al carecer de insumos y estudios al respecto la predicción realizada se ajusta muy bien al propósito proyectado.

## 12.5 Predicción con la matriz de transición de IDIRISI

Tabla 30. Predicción año 2025.

Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
7,171466	7,772491	34,750719	51,848317	12,133275	6,771914	11,062582	127,148252	61,036951	2,287369

Fuente: IDIRISI.

### *Herbazales*

Solo el 47% de la cobertura perteneciente a herbazales permanecería en su estado, 11% migrará a coberturas de suelo urbano, comportamiento asociado a la alta demanda de suelo en estos municipios para fincas de recreación y descanso; un 14% y 13% cambiarán a coberturas de Arbustos y Matorrales y Pastos enmalezados respectivamente, esto podría deberse a la no intervención del hombre en estos suelos que por efectos de cambios bruscos en el clima hacen que los suelos tiendan a volverse malezas y matorrales; en la tabla N° 30 podemos apreciar el comportamiento general de la cobertura Herbazales.

Tabla 31. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>HERBAZALES</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	46,98%
Bosques	3,58%
Arbustos y Matorrales	14,20%
Pastos Enmalezados	13,19%
Cultivos	1,92%
Zonas Pantanosas	2,45%
Cultivos Confinados	3,84%
Pastos Limpios	2,30%
Urbano	10,94%
Lagos	0,60%

Fuente: IDIRISI

La cobertura de herbazales para el año 2025 perderá aproximadamente 3,24 km<sup>2</sup> de su actual extensión, la mayor parte como se mencionó cambiara a arbustos y matorrales, pastos enmalezados y suelo urbano.

### *Bosques*

Como se aprecia en la tabla N° 31 los bosques tienen una conducta interesante, estos valores nos permiten ver como los bosques tienden a desaparecer con el paso del tiempo, tan solo el 40% de

los bosques se mantendrían intactos, se prevé que la pérdida de bosques de estos dos municipios en 10 años será de 4,43 km<sup>2</sup>, es decir solo quedarán 7,77 km<sup>2</sup>, un 46% de ellos serían principalmente Arbustos y Matorrales. Este estudio pretende ser un insumo para ayudar a las entidades municipales y departamentales a tomar medidas contra esta problemática no solo de estos dos municipios si no del resto del país.

Tabla 32. Probabilidad de cambios de Bosques año 2025.

<b>BOSQUES</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	4,13%
Bosques	39,93%
Arbustos y Matorrales	45,95%
Pastos Enmalezados	8,14%
Cultivos	0%
Zonas Pantanosas	0%
Cultivos Confinados	1,62%
Pastos Limpios	0%
Urbano	0%
Lagos	0,22%

Fuente: IDIRISI.

### *Arbustos y matorrales*

Esta cobertura perderá solo 0,89 km<sup>2</sup> del área inicial, es decir 35% permanecería igual; el 19% se transformaría en Pastos Enmalezados como consecuencia del cambio climático y la ausencia de intervención oportuna del hombre; el 16% se convertiría en pastos limpios que serían aquellos suelos que el hombre ha tratado y manejado y que posteriormente se podrían utilizar para el cultivo de tubérculos, hortalizas o ganadería y un 11% estaría destinado según la predicción al suelo Urbano tal como se muestra en la tabla N°32, como se mencionó con anterioridad, esto se puede deber a la gran acogida que han tenido los municipios para la construcción de fincas de descanso

y recreación así como las zonas de expansión urbana contempladas en los esquemas de ordenamiento territorial de ambos municipios.

Tabla 33. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>ARBUSTOS Y MATORRALES</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	3,66%
Bosques	4,18%
Arbustos y Matorrales	34,49%
Pastos Enmalezados	19,17%
Cultivos	3,04%
Zonas Pantanosas	3,58%
Cultivos Confinados	5,17%
Pastos Limpios	15,74%
Urbano	10,96%
Lagos	0,01%

Fuente: IDIRISI

### *Pastos enmalezados*

Los Pastos enmalezados no tienen un cambio significativo con respecto a las demás coberturas, se estimó que en los próximos 10 años aumentara su superficie 1,50 km<sup>2</sup>, el 53% de esta cobertura continuaría como Pastos Enmalezados; 18% debido al mantenimiento defectuoso tendería a convertirse en Arbustos y Matorrales, parte del área de pastos enmalezados cambiara a arbustos y matorrales también se da el caso contrario, donde del área de arbustos pasa gran parte de la nueva superficie de pastos. Un 21% de los pastos enmalezados pasaría a ser de Pastos Limpios, esto como gracias a la buena intervención humana con el cuidado y adecuado manejo de los pastos con fines de cultivos. El 8% restante se distribuye en las demás coberturas. Ver tabla N°33.

Tabla 34. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>PASTOS ENMALEZADOS</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>



Herbazales	0,54%
Bosques	1,77%
Arbustos y Matorrales	18,24%
Pastos Enmalezados	52,51%
Cultivos	0,41%
Zonas Pantanosas	0,88%
Cultivos Confinados	0,70%
Pastos Limpios	21,40%
Urbano	3,54%
Lagos	0,00%

Fuente: IDIRISI

### *Cultivos*

La cobertura de cultivos tiene un comportamiento que se puede explicar con la práctica de rotación de cultivos, como podemos apreciar en la tabla N°34, tan solo el 15% de los 20,65 km<sup>2</sup> destinados a cultivos en el 2015 perseverarían su condición de cultivos, es decir se estimó una pérdida de área de 8,55 km<sup>2</sup>, esto no quiere decir que necesariamente se sigan ubicando espacialmente de la misma manera, de hecho, pudieron haberse desplazado a otras zonas del municipio; de manera a priori, podríamos predecir que a coberturas que antes eran de Pastos Limpios. Así mismo podemos ver como el cambio más repentino contempla que 12 km<sup>2</sup>, es decir, el 58% se transformarían en Pastos Limpios, y un 15% adicional a suelo de uso urbano.

Tabla 35. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>CULTIVOS</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	0,27%
Bosques	0,05%
Arbustos y Matorrales	1,51%
Pastos Enmalezados	5,29%
Cultivos	14,87%
Zonas Pantanosas	2,91%
Cultivos Confinados	2,35%

Pastos Limpios	57,75%
Urbano	15,00%
Lagos	0%

Fuente: IDIRISI

### *Zonas pantanosas*

La pérdida de área de esta cobertura oscila los 0,85 km<sup>2</sup>, la estimación precisa se dificulta por su propia naturaleza, la poca profundidad de los cuerpos de agua, las cantidades de vegetación que pueden llegar a albergar y su estado transitorio, dificulta a esta escala una predicción veraz.

### Cultivos confinados

El beneficio monetario de esta actividad económica se ve reflejado en el crecimiento proyectado, los invernaderos tendrán un aumento de 0,36 km<sup>2</sup>. Los cultivos confinados amén de la rotación de cultivos obedece a un comportamiento similar al de los Cultivos abiertos, sin embargo, algunos productores prefieren continuar con los cultivos de flores y evitan la siembra de otros productos en sus terrenos, sobre todo a la alta inversión tecnológica que se debe realizar para poder mantener un cultivo confinado; aun así, vemos según la tabla N°35 que el 15% del espacio destinado para cultivos confinados sería para el 2025 utilizado como Pastos Limpios, y un 17% habría usado este suelo para la construcción de fincas, casas u otro tipo de construcciones.

Tabla 36. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>CULTIVOS CONFINADOS</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	0,25%
Bosques	0,32%
Arbustos y Matorrales	7,84%
Pastos Enmalezados	9,35%
Cultivos	8,72%
Zonas Pantanosas	3,34%
Cultivos Confinados	38,68%

Pastos Limpios	14,51%
Urbano	16,85%
Lagos	0,15%

Fuente: IDIRISI

### *Pastos limpios*

Para esta cobertura debemos tener en cuenta que las imágenes que se tuvieron en cuenta fueron tomadas en el primer trimestre del año, tiempo en el que el clima varía enormemente, teniendo enero como el mes más frío del año y marzo como el más caliente; de manera que los cultivos se presentan mayormente en el segundo semestre, de manera que la cobertura no tendría un cambio significativo, esto se evidencia en la tabla N°36, que bien nos muestra que el 66% permanecería como pastos limpios; un 12% derivado a factores como la construcción de fincas de recreo y descanso y zonas de expansión urbana examinados en los esquemas de ordenamiento territorial, migraría a suelo urbano y un 9% amén del mal manejo de la cobertura, se convertiría en Pastos Enmalezados. Para el año 2025 se perderán aproximadamente 4,22 km<sup>2</sup> de esta cobertura.

Tabla 37. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>PASTOS LIMPIOS</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de Cambio</b>
Herbazales	0,09%
Bosques	0%
Arbustos y Matorrales	2,85%
Pastos Enmalezados	9,83%
Cultivos	4,77%
Zonas Pantanosas	2,53%
Cultivos Confinados	1,95%
Pastos Limpios	66,37%
Urbano	11,58%
Lagos	0,03%

Fuente: IDIRISI

### *Urbano*

Difícilmente la cobertura destinada al suelo urbano sufrirá variaciones, así se evidencia en la tabla N°37 que nos muestra como el 74% de las zonas urbanas seguirían siendo urbanas, y escasamente un 21.25% pasaría a coberturas de pastos limpios, el crecimiento proyectado de los cascos urbanos será de 19,26 km<sup>2</sup>, un crecimiento muy acelerado para la población que albergan, aproximadamente 1,9 km<sup>2</sup> anuales.

Tabla 38. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>URBANO</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de Cambio</b>
Herbazales	0%
Bosques	0%
Arbustos y Matorrales	0%
Pastos Enmalezados	0,31%
Cultivos	0,88%
Zonas Pantanosas	0,60%
Cultivos Confinados	2,56%
Pastos Limpios	21,25%
Urbano	74,31%
Lagos	0,09%

Fuente: IDIRISI

### *Lagos*

La tendencia de los lagos es al aumento del área, el crecimiento estimado oscila entre 1 km<sup>2</sup>, de manera similar a la cobertura de suelo urbano, la capa de lagos laboriosamente se trasladaría a otras coberturas, sin embargo, solo el 65% se conservaría como Lagos; sin embargo, los arrastres de sedimentos de coberturas alrededor de estos hacen que el lago se enlode, así como la proliferación de especies de plantas como los lirios acuáticos y las algas marinas hacen que los lagos tiendan a transformarse en zonas de pantanos; es así como la predicción nos demuestra que al menos 0,26 km<sup>2</sup> de Lagos en el 2025 serán Zonas pantanosas.

Tabla 39. Probabilidad de cambios de Herbazales año 2025.

<b>LAGOS</b>	
<b>Cobertura</b>	<b>Porcentaje de cambio</b>
Herbazales	0,01%
Bosques	0%
Arbustos y Matorrales	0%
Pastos Enmalezados	4,63%
Cultivos	0%
Zonas Pantanosas	21,43%
Cultivos Confinados	1,11%
Pastos Limpios	1,44%
Urbano	6,10%
Lagos	65,28%

Fuente: IDIRISI

### 13. Conclusiones

Las técnicas usadas para realizar la clasificación de la cobertura y uso del suelo para las dos épocas estudiadas han sido satisfactorias, las clasificaciones fueron comparadas con aerofotografías actualizadas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi para su aprobación, finalmente es claro que el incremento de la resolución espacial de los sensores el tiempo transcurrido entre las épocas de estudio y la inclusión de variables no solo geográficas si no económicas, sociales, políticas y ambientales incrementa la exactitud de las predicciones.

El cambio de uso del suelo más importante ocurrido en la zona de estudio es el incremento de las superficies urbanas, en el año 2025 se prevé que la superficie aumente un 32%, es decir 1,3 km<sup>2</sup> anualmente, entre los usos y coberturas que más área cederán al fenómeno de urbanización se encuentran las zonas pantanosas, los cultivos, arbustos y matorrales, los pastos limpios y los herbazales, los bosques, aunque en menor escala, aportan a los procesos de urbanización cerca de 165000m<sup>2</sup>, que, aunque pueda parecer una porción de tierra poco significativa es una de las principales causas de pérdida de bosque en los municipios.

La prueba Chi cuadrado de Homogeneidad dio como resultado la aceptación de la hipótesis nula, las matrices de transición elaboradas por los dos métodos diferentes provienen de los mismos datos y por consiguiente son muy homogéneas las probabilidades de cambio, con esto se demuestra que la dinámica del uso del suelo en estos dos departamentos se puede predecir con un alto nivel de exactitud, sin el estricto uso de información de crecimiento poblacional, políticas públicas, cambios climáticos entre otros.

Las coberturas de Bosques, Cultivos y Herbazales sufren un mayor detrimento en el periodo de estudio, en las que se pierden alrededor de 20, 79.5 y 9.5 hectáreas respectivamente. Sin embargo,

cabe resaltar, que el cambio violento asociado al cambio de cultivos sobre todo a coberturas de pastos limpios (52.8125 Has) puede asociarse a la rotación de cultivos que se presenta en los suelos con bondades para ejercer la agricultura.

Se recomienda a las entidades territoriales manejar en sus esquemas y planes básicos de ordenamiento territorial, una normatividad en la que la protección de los bosques sea imperativa y que pueda controlarse pues como se mencionó en el proyecto, los bosques de estos dos municipios son hábitat natural de casi 200 especies de aves, mamíferos y peces.

## 14. Referencias Bibliográficas

- Delucchi, L., Nex, F., Gianelle, D., Neteler, M., Remondino, F., & Dalponte, M. (2015). Land Cover Classification and Monitoring: the STEM Open Source Solution. *European Journal of Remote Sensing*, 811-812.
- Adebola, A. O., Adegboyega, S., & Olajuyigbe, A. E. (2015). Modelling of land use and land cover change in Ibadan North-West local government area (LGA), Nigeria using satellite imageries and GIS techniques. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 138-166.
- Alcaldía de El Rosal - Cundinamarca. (05 de 07 de 2016). *Sitio oficial de El Rosal en Cundinamarca, Colombia*. Obtenido de [http://www.elrosal-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.elrosal-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml)
- Alcaldía El Rosal. (2011). *Diagnostico*. El Rosal.
- Alcaldía El Rosal. (2012). *Diagnostico Municipio el Rosal*. El Rosal.
- Alcaldía Rosal. (2004). *Plan de desarrollo municipal*. El Rosal.
- Alcaldía Subachoque. (2008). *Diagnóstico*. Subachoque.
- Banco de la República. (1996). *Tras las huellas: Dos viajeros Alemanes en tierras Latinoamericanas*. Santafé de Bogotá: Banco de la República.
- Bell, E. (1974). Markov analysis of land use change an application of stochastic processes to remotely sensed data. *Socio Economic Planning Science*, 311-316.
- Briceño, F. (2003). Cambios de Cobertura de la Tierra en el Valle del Río Momboy, Estado Trujillo. *Revista Venezolana de Geografía y su enseñanza*, 91-100.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp S.A.
- CIAF. (2005). *Interpretación Visual de Imágenes de Sensores Remotos y su Aplicación en Levantamientos de Cobertura y Uso de la Tierra*. Bogotá.
- Climate-Data. (2016). *Climate-Data*. Obtenido de <http://es.climate-data.org/>
- Comité Municipal para la atención integral a la población desplazada. (10 de 11 de 2009). *Alcaldía de El Rosal - Cundinamarca*. Obtenido de [http://www1.cundinamarca.gov.co/PIU-2012/CUNDINAMARCA%20%202012/PLANES%20INTEGRALES%20%C3%9ANICOS%20-%20PIU/DOCUMENTOS%20PIU/CUNDINAMARCA\\_EL\\_ROSAL/PIU.pdf](http://www1.cundinamarca.gov.co/PIU-2012/CUNDINAMARCA%20%202012/PLANES%20INTEGRALES%20%C3%9ANICOS%20-%20PIU/DOCUMENTOS%20PIU/CUNDINAMARCA_EL_ROSAL/PIU.pdf)
- DANE. (26 de Marzo de 2016). *Censo 2005: Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co)
- ERDAS. (2011). *ERDAS Tour Guide*. Bogotá.
- ERDAS. (2014). *ERDAS Field Guide*. Bogotá.
- European Environment Agency. (01 de Enero de 1995). *European Environment Agency Publications*. Recuperado el 23 de 04 de 2016, de <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>



- European Environment Agency. (1997). *Corine Land Cover Technical Guide*.
- Hord, M. (1982). *Digital image processing or remotely sensed data*. Virginia: Academic Press.
- IDEAM. (2005). *IDEAM sitio web*. Recuperado el 23 de Marzo de 2016, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra: Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (25 de 06 de 2015). *Catálogo de datos del IDEAM*. Obtenido de <http://www.datos.gov.co/frm/catalogo/frmCatalogo.aspx?dsld=62954>
- IGAC. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM*. Bogotá.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. United States of America: Prentice Hall.
- Kloer, B. (1994). *Hybrid parametric/non-parametric image classification*. USA.
- L. Urban, D., & O. Wallin, D. (2002). Learning landscape ecology: A practical guide to concepts and techniques. En S. E. Gergel, & M. G. Turner. New York : Springer .
- Latorre, L. R. (2011). *Plan Municipal de Atención Integral a la Población en Condición de Desplazamiento Municipio de Subachoque*. Subachoque.
- Ley 387 (Congreso de Colombia 18 de 07 de 1997).
- Lonsdon, M. (1996). Probability Mapping of land use change: a GIS interface for visualizing. *Computer, Environment and Urban Systems*, 389-398.
- Mesa de Planificación Regional Bogotá - Cundinamarca; UNDESA; UNCRD. (2005). *De las Ciudades a las Regiones: Desarrollo regional integrado en Bogotá - Cundinamarca; UNDESA; UNCRD*. Bogotá: Bogotá.
- Meteored. (22 de Diciembre de 2015). *Meteored.mx*. Obtenido de [http://www.meteored.mx/historico/clima\\_El+Rosal-America+Sur-Colombia-Cundinamarca--1-18751.html](http://www.meteored.mx/historico/clima_El+Rosal-America+Sur-Colombia-Cundinamarca--1-18751.html)
- Monge Ivars, J. F., & Pérez, J. (s.f). *Universidad abierta de Cataluña*. Obtenido de [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Chi\\_cuadrado.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Chi_cuadrado.pdf)
- Mora Zamora, R., Aguilar Arias, H., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot y Landsat 8 con el módulo Flaash del software Envi. *Revista Geográfica de América Central*, 39-59.
- Municipio de El Rosal. (2011). *Acuerdo N° 03 de 2011, Esquema de Ordenamiento Territorial*. El Rosal.
- Ordenanza N° 25, Ordenanza 25 de 1997 (Asamblea de Cundinamarca 25 de Septiembre de 1997).

- Rincón, L. (2012). *Introducción a los procesos estocásticos*. México DF.
- Rojo, H., & Miranda, M. (2009). *Cadenas de Markov*. Buenos Aires: Facultad Ingeniería.
- Swain, S. D. (1978). *Remote sensing: The quantitative approach*. New York: McGraw-Hill .
- U.S. Geological Survey. (2011). *U.S. Geological Survey*. Obtenido de <http://www.usgs.gov>
- Unidad para la atención y reparación integral a las víctimas. (02 de 06 de 2013). *Unidad Para Las Víctimas*. Obtenido de <http://www.cjviracastro.org.co/attachments/article/500/Informe%20de%20Desplazamiento%201985-2012%20092013.pdf>
- UPRA. (2015). *Avalúos Catastrales Integrales de la Tierra (SMMLV 2014)*. Bogotá.
- Valera, F., & Castellano, A. (2010). Dinámica del uso de la tierra en la cuenca del río Castán, Trujillo - Venezuela. *ISNN*, 61-72.
- Vicéns Otero, J., & Medina Moral, E. (Enero de 2005). *Universidad Autónoma de Madrid* . Obtenido de [https://www.uam.es/personal\\_pdi/economicas/eva/pdf/tab\\_conting.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/economicas/eva/pdf/tab_conting.pdf)

### Anexo A: Cambio usos y coberturas del 2015 al 2025

<i>Cambio</i>	<i>Área Km</i>	<i>Área m</i>
<b>Herbazales</b>	7,44605	7446050
<b>Bosques a Herbazales</b>	1,0558	1055800
<b>Arbustos y matorrales a Herbazales</b>	0,650041	650041
<b>Pastos enmalezados a Herbazales</b>	0,024843	24843
<b>Cultivos a Herbazales</b>	0,103929	103929
<b>Pastos Limpios a Herbazales</b>	0,069521	69520,7
<b>Herbazales a Bosques</b>	0,590612	590612
<b>Bosques</b>	11,0514	11051400
<b>Arbustos y matorrales a Bosques</b>	0,766301	766301
<b>Pastos enmalezados a Bosques</b>	0,391379	391379
<b>Cultivos a Bosques</b>	0,08281	82810
<b>Pastos Limpios a Bosques</b>	0,086083	86082,7
<b>Herbazales a Arbustos y matorrales</b>	2,0276	2027600
<b>Bosques a Arbustos y matorrales</b>	14,5519	14551900
<b>Arbustos y matorrales</b>	8,09889	8098890
<b>Pastos Enmalezados a Arbustos y matorrales</b>	4,75795	4757950
<b>Cultivos a Arbustos y matorrales</b>	2,34369	2343690
<b>Zonas Pantanosas a Arbustos y matorrales</b>	0,066248	66248
<b>Cultivos Confinados a Arbustos y matorrales</b>	0,585104	585104
<b>Pastos Limpios a Arbustos y matorrales</b>	3,07376	3073760
<b>Herbazales a Pastos Enmalezados</b>	2,305	2305000
<b>Bosques a Pastos Enmalezados</b>	3,12883	3128830
<b>Arbustos y Matorrales a Pastos Enmalezados</b>	4,84412	4844120
<b>Pastos Enmalezados a Pastos Enmalezados</b>	14,4164	14416400
<b>Cultivos a Pastos Enmalezados</b>	7,85036	7850360
<b>Cultivos Confinados a Pastos Enmalezados</b>	0,604153	604153
<b>Pastos Limpios a Pastos Enmalezados</b>	12,1887	12188700
<b>Herbazales a Cultivos</b>	0,295269	295269
<b>Bosques a Cultivos</b>	0,033124	33124
<b>Arbustos y Matorrales a Cultivos</b>	0,530098	530098
<b>Pastos Enmalezados a Cultivos</b>	0,281554	281554
<b>Cultivos</b>	13,6876	13687600
<b>Cultivos Confinados a Cultivos</b>	0,672464	672464
<b>Pastos Limpios a Cultivos</b>	5,61659	5616590
<b>Urbano a Cultivos</b>	0,016562	16562
<b>Herbazales a Zonas pantanosas</b>	0,273273	273273
<b>Arbustos y matorrales a Zonas pantanosas</b>	0,737009	737009

<b>Pastos enmalezados a Zonas pantanosas</b>	0,174882	174882
<b>Cultivos a Zonas pantanosas</b>	1,90254	1902540
<b>Cultivos confinados a Zonas pantanosas</b>	0,215306	215306
<b>Pastos Limpios a Zonas pantanosas</b>	2,11934	2119340
<b>Lagos a Zonas pantanosas</b>	0,215306	215306
<b>Herbazales a Cultivos Confinados</b>	0,795457	795457
<b>Bosques a Cultivos Confinados</b>	0,86592	865920
<b>Arbustos y matorrales a Cultivos Confinados</b>	1,58619	1586190
<b>Pastos enmalezados a Cultivos Confinados</b>	0,100715	100715
<b>Cultivos a Cultivos Confinados</b>	2,31947	2319470
<b>Cultivos Confinados</b>	2,94232	2942320
<b>Pastos Limpios a Cultivos Confinados</b>	2,10277	2102770
<b>Urbano a Cultivos Confinados</b>	0,049686	49686
<b>Lagos a Cultivos Confinados</b>	0,016562	16562
<b>Herbazales a Pastos Limpios</b>	0,607786	607786
<b>Bosques a Pastos Limpios</b>	0,074529	74529
<b>Arbustos y matorrales a Pastos Limpios</b>	3,00718	3007180
<b>Pastos enmalezados a Pastos Limpios</b>	3,78974	3789740
<b>Cultivos a Pastos Limpios</b>	52,8125	52812500
<b>Cultivos Confinados a Pastos Limpios</b>	1,2826	1282600
<b>Pastos Limpios</b>	61,4574	61457400
<b>Urbano a Pastos Limpios</b>	0,45594	455940
<b>Herbazales a Urbano</b>	2,34503	2345030
<b>Bosques a Urbano</b>	0,16562	165620
<b>Arbustos y matorrales a Urbano</b>	2,099	2099000
<b>Pastos enmalezados a Urbano</b>	1,0249	1024910
<b>Cultivos a Urbano</b>	12,0063	12006300
<b>Zonas pantanosas a Urbano</b>	0,136999	136999
<b>Cultivos Confinados a Urbano</b>	1,60897	1608970
<b>Pastos Limpios a Urbano</b>	12,2276	12227600
<b>Urbano</b>	1,6385	1638500
<b>Lagos a Urbano</b>	0,049686	49686
<b>Herbazales a Lagos</b>	0,173901	173901
<b>Bosques a Lagos</b>	0,089668	89667,7
<b>Cultivos a Lagos</b>	0,066248	66248
<b>Zonas Pantanosas a Lagos</b>	0,107653	107653
<b>Pastos Limpios a Lagos</b>	0,207025	207025
<b>Lagos</b>	0,554827	554827
<b>Área total</b>	298,701083	298701092

**Anexo B: Predicción con la matriz de transición según L. Urban y O. Wallin**

Herbazales	Bosques	Arbustos y Matorrales	Pastos Enmalezados	Cultivos	Zonas Pantanosas	Cultivos Confinados	Pastos Limpios	Urbano	Lagos
7,864614	9,081580	35,690440	54,590132	16,556073	6,570107	11,323438	122,340885	55,178209	2,792280